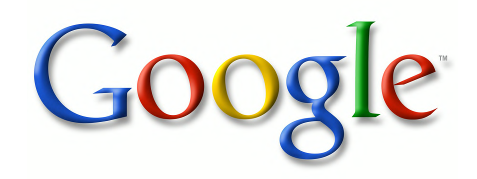




L'ÉLECTRICITÉ

DU MÊME AUTEUR

DANS LA MÊME COLLECTION

La Physique moderne, son évolution (8e mille), 1 volume.

Bibliothèque de Philosophie scientifique

L'ÉLECTRICITÉ

PAR

LUCIEN POINCARÉ

INSPECTEUR GÉNÉRAL DE L'INSTRUCTION PUBLIQUE



PARIS

ERNEST FLAMMARION, EDITEUR

26, RUE RACINE, 26

1907

L'ÉLECTRICITÉ

PRÉFACE

Dans mon livre : « *La Physique moderne* », je n'ai étudié ni les modes de production et d'utilisation des courants électriques, ni les multiples applications qui appartiennent au domaine de l'électrotechnique.

Ce nouveau volume est consacré à l'examen des questions volontairement laissées de côté tout d'abord.

Il existe un grand nombre de traités d'électrotechnique, et plusieurs sont excellents. Les uns, telles, par exemple, les admirables *Leçons d'Électrotechnique générale*, de mon éminent ami M. P. Janet, sont des traités savants et complets ; les autres sont de très intéressants essais de vulgarisation.

Mon intention n'est pas de refaire, moins bien, ce qui, si souvent déjà, a été fait, et je n'ai pas cherché à écrire un livre, utile pour les seuls spécialistes, ou, au contraire, convenable pour des débutants inexpérimentés.

J'ai voulu m'adresser à ce public éclairé, si nombreux aujourd'hui, qui s'intéresse avec passion au progrès des sciences et lui présenter un tableau, aussi fidèle que possible, de l'état actuel de l'Électricité ; j'ai tâché d'indiquer nettement le point de départ et le point d'arrivée, et j'ai, particulièrement, insisté sur les conséquences pratiques, d'ordre général, que l'ingéniosité des chercheurs a su tirer des principes.

Peut-être, aussi, m'est-il permis d'espérer que je pourrai rendre quelques services aux physiciens qui, trop souvent encore, ignorent les applications que les ingénieurs ont faites, dans l'industrie, des découvertes sorties du laboratoire, et, de l'autre côté, à ces ingénieurs eux-mêmes qui, parfois, perdent un peu de vue la source scientifique d'où découle toute vérité.

Si l'on réfléchit à l'influence qu'a toujours exercé le développement des arts sur l'état social ; si l'on veut bien accorder que nos idées et nos théories sont, dans la réalité, le plus souvent commandées par les mœurs et les habitudes de la vie, on pensera, sans doute, qu'un volume, où l'on a fait une large part aux grandes applications, où l'on s'est efforcé de marquer, par des faits précis, le sens de l'évolution actuelle des industries, n'est pas déplacé dans une collection consacrée à des études de philosophie scientifique.

CHAPITRE I

L'Énergie électrique et ses applications industrielles.

---

§ 1.

Tout le monde s'accorde à dire que l'avenir est à l'électricité, et certes les brillantes conquêtes d'hier autorisent les plus vastes espoirs pour demain.

En quelques années, l'usage du courant électrique a transformé nos procédés d'éclairage, nos moyens de transport, nos industries chimiques ; le télégraphe et le téléphone ont complètement modifié les conditions de la vie sociale ; les découvertes sur la radiographie et la haute fréquence ont amené de profonds changements dans la pratique médicale, et d'autre part, chacun sait que l'étude des corps radioactifs a conduit les physiciens à d'audacieuses conceptions sur la constitution de la matière et sur les lois de la nécanique : aux yeux de beaucoup de savants nodernes, les phénomènes électriques doivent être onsidérés désormais comme jouant dans la nature ın rôle prépondérant, la particule d'électricité,

l'électron, serait en quelque sorte le substratum universel.

Tous ces progrès furent si extraordinairement rapides que l'homme qui les contemple, pris d'un véritable émerveillement, se laisse volontiers entraîner hors du domaine des faits scientifiquement établis et se prend à rêver des applications futures plus prodigieuses encore que celles d'aujourd'hui.

L'électricité garde d'ailleurs, pour la plupart des personnes, un caractère particulièrement étrange ; le mystère qui l'entoure invite l'imagination à se donner libre carrière et pousse les esprits les plus réservés à des hardiesses de pensée que ne connaissent pas, même les plus téméraires, lorsqu'il s'agit des autres manifestations naturelles depuis plus longtemps connues et utilisées.

Il n'est pas mauvais, au seuil d'une étude sur sur l'électricité, d'examiner d'un peu près les raisons pour lesquelles, malgré tant de recherches heureuses, cette partie de la physique continue à paraître une région qui, plus que toute autre, conserve quelque chose de secret et de caché, et il peut être intéressant de rechercher si cette apparence est, dans la réalité des choses, solidement et sérieusement fondée.

A vrai dire, le physicien le plus savant ne saurait donner aucune réponse satisfaisante à des questions qui semblent au public particulièrement simples, et, malgré tant d'efforts dignes d'admiration, il ignore encore profondément quelle est la véritable nature des phénomènes électriques. Que peut-il dire à ceux qui désirent se représenter d'une façon

tangible un courant électrique, qui s'attendent à voir ce qui se passe dans le fil conducteur ou à toucher, en quelque sorte, les lignes de force d'un champ magnétique ? S'il ne veut pas reconnaître son impuissance, il est obligé d'employer des comparaisons, véritables métaphores scientifiques qui habillent l'ignorance de vêtements plus ou moins bien ajustés ou commodes, mais qui la laissent subsister entière.

Que l'on veuille bien cependant réfléchir quelque peu et l'on s'apercevra que l'embarras où se trouve le savant serait aussi grand s'il lui fallait fournir une explication complète de n'importe quel autre phénomène physique, même pris parmi les plus familiers. Que répondrait-il, par exemple, à l'indiscret questionneur qui désirerait savoir pourquoi un corps est plus chaud qu'un autre, comment se propage la chaleur dans une tige conductrice, ou encore comment elle prend naissance et disparaît, tandis que se détruisent ou apparaissent d'autres formes d'énergie ?

Si, devant l'une des applications les plus simples et les plus vulgaires du courant électrique, en face, je suppose, d'une modeste sonnette électrique, le physicien se trouve un peu gêné quand on lui demande comment l'énergie de la pile se transporte le long du fil et à quelles modifications dans le fer correspond l'aimantation de l'électro-aimant, n'est-il pas en droit de faire remarquer qu'il ne saurait, davantage, satisfaire pleinement la curiosité de qui voudrait se rendre un compte entièrement exact des raisons profondes pour lesquelles la vieille et res-

pectable sonnette d'autrefois fait entendre un son lorsque l'on tire sur le cordon?

Refusant de se payer de mots, allant au fond des choses, ne peut-on, en effet, considérer comme grandement mystérieuse l'existence des liaisons entre les particules qui constituent un solide et qui permettent la transmission de la tension le long du fil, comme inexpliquée aussi la cause des réactions élastiques qui font vibrer la cloche, et comme, pleine d'obscurité, la nature de la pesanteur qui donne au battant son mouvement d'oscillation.

Les esprits, même les plus cultivés, ont une tendance aussi naturelle que trompeuse à croire qu'ils ont compris la cause d'un phénomène lorsqu'une explication a été fournie qui ramène ce phénomène à quelqu'autre plus anciennement connu et auquel depuis longtemps on est habitué.

Ainsi interviennent des contingences, des actions de milieu qui nous font considérer les choses comme plus ou moins mystérieuses, suivant le hasard qui souvent seul a amené l'ordre des découvertes. Ainsi l'éducation, l'hérédité peut-être, deviennent-elles des facteurs importants qui donnent à notre curiosité ses divers degrés d'exigence.

L'enfant d'aujourd'hui qui, dès sa naissance, aura vu la lumière électrique répandue à profusion, qui aura entendu la voix du téléphone mêlée à ses balbutiements, qui aura essayé ses premiers pas dans des voies sillonnées de tramways ne jugera sans doute pas aussi prodigieuses ces applications qui ont rempli d'étonnement la génération qui l'a précédé dans la vie.

Le mystère subsistera, mais il paraîtra moins étrange ; devenu familier, il sera plus difficile à apercevoir, il sera semblable à ces bruits pour lesquels l'oreille habituée devient sourde, à ces parfums que l'odorat, fatigué par l'accoutumance, ne perçoit plus.

Peut-être même, quelques-uns le nieront-ils alors et faudra-t-il leur rappeler qu'il ne suffit pas de ne plus le regarder pour le dissiper. Il n'est pas d'ailleurs tel que le conçoit le vulgaire et ses raisons profondes sont celles-là même que l'on rencontre quand on examine tous les phénomènes naturels : l'imparfaite adaptation de nos sens au monde extérieur explique suffisamment pourquoi nous ne saurions construire des représentations qui soient en parfaite conformité avec la réalité objective.

§ 2.

Lorsqu'il s'agit de l'électricité ou du magnétisme, cette infirmité de l'homme devient particulièrement manifeste. On peut dire qu'ici, non seulement nos sens sont incapables de nous fournir des perceptions harmoniques aux phénomènes véritables, mais même qu'ils restent presque entièrement insensibles et muets.

Sans doute nous pouvons ressentir des secousses électriques très intenses, douloureuses même et ·fois mortelles ; sans doute nous éprouvons quel- ɘs malaises au moment des orages, lorsque notre ·entiel varie brusquement, mais combien con- es sont de telles impressions et combien vagues

les renseignements qu'elles nous peuvent fournir.

Il est vrai aussi que dans la théorie électromagnétique, les phénomènes lumineux sont considérés comme des phénomènes électriques, que, pour les partisans des idées récentes, la matière tout entière est composée de particules électrisées, et que, par suite, nos yeux et les autres organes de nos sens sont, au regard des physiciens, autant de récepteurs sensibles à l'énergie électrique.

Mais l'on est néanmoins fondé à dire que ces organes sont, pour le moins, singulièrement impropres à nous donner une perception bien définie, lorsqu'il s'agit des manifestations ordinaires de l'électricité ou du magnétisme : Introduits dans un champ électrique, nous ne sommes que bien vaguement impressionnés ; dans un champ magnétique nous restons entièrement insensibles.

Cette infirmité est sans doute la raison principale pour laquelle, dans le passé, ont été si lents et si pénibles les progrès de l'électricité : Durant les longs siècles où la science tâtonnait dans l'obscurité, où les règles de l'expérimentation étaient encore mal comprises et le plus souvent incorrectement appliquées, les hommes ne surent faire aucun effort pour pénétrer dans le monde inconnu qui s'ouvrait si près d'eux mais dont ils ne soupçonnaient ni les richesses ni l'étendue.

Le jour où la véritable méthode physique fut enfin solidement assise, cette absence de sens spécial qui avait été une cause retardatrice perdit toute influence et l'on pourrait même, sans paradoxe, soutenir qu'elle devint presque un avantage.

Elle obligea en effet les physiciens à raisonner d'une manière plus objective, elle les amena à chercher les lois réelles des phénomènes, elle les contraignît à donner des définitions précises et, ainsi, sur des bases solides s'édifièrent les beaux édifices de l'ancienne électricité statique et de la théorie du magnétisme.

Après les découvertes de Coulomb, les travaux des Poisson, des Green, des Gauss, amenèrent presque à la perfection la théorie des équilibres électrique et magnétique; ces travaux restent des modèles de l'application du calcul à l'étude d'un phénomène physique ; ils constituent un ensemble merveilleusement lié et ils démontrent comment, par la rigoureuse et puissante logique de l'analyse mathématique, on peut, de quelques faits élémentaires soigneusement observés, de quelques mesures correctement exécutées sur des grandeurs bien définies, tirer un ensemble imposant de déductions inattendues.

Ne pouvant s'orienter que par la puissance de l'esprit dans un domaine en quelque sorte fermé à leurs sensations, ces illustres savants surent y trouver des routes d'autant plus sûres qu'elles étaient tracées à la suite d'observations délicates et précises et que rien ne pouvait être laissé au hasard d'une impression irraisonnée ou d'une illusion trompeuse.

Dans les autres chapitres de la physique, la mar-
e de la Science a généralement été commandée,
contraire, et parfois retardée par le caprice de
›s impressions : de tout temps, par exemple, les

hommes ont eu chaud et froid, et depuis longtemps les physiciens ont parlé de températures plus ou moins élevées, mais combien de siècles a-t-il fallu pour que cette notion de température se dégageât nettement et pût être présentée comme indépendante des indications arbitraires et aléatoires fournies par nos sens !

Tout le monde connaît le parallélisme que l'on établit, dans l'enseignement élémentaire, entre les phénomènes électriques et les phénomènes calorifiques ; on compare la quantité d'électricité à la quantité de chaleur, le niveau électrique ou le potentiel à la température, la capacité électrique à la capacité calorifique et ces comparaisons ne laissent peut-être pas que de présenter quelque utilité pour les débutants.

Mais outre qu'elles sont forcément condamnées à rester assez vagues, elles risquent fort, si l'on insiste trop, d'amener à des idées peu conformes à la véritable nature des choses ; le professeur, qui en abuse, ressemble un peu à ce voyant qui, interrogé par un aveugle, sur le sens qu'il convient d'attacher à la notion de lumière rouge s'évertuerait à lui expliquer que cette lumière est fort analogue au son du clairon.

Pour ceux qui ont l'esprit plus mûr et qui ont acquis déjà des connaissances plus étendues, ces procédés pédagogiques doivent être proscrits, parce que, malgré leurs prétentions erronnées, ils ne vont pas en vérité du simple au composé, et parce qu'ils nous font perdre le précieux avantage que nous pouvons nous procurer quand, pour raisonner d'un

phénomène, nous savons ne pas appuyer nos démonstrations sur la base fragile que nous peuvent fournir nos sensations.

Aussi bien, l'on peut remarquer que, relativement aux phénomènes électriques, notre connaissance est, à certains égards, d'un degré supérieur à celle à laquelle nous sommes arrivés en ce qui concerne la chaleur.

Le potentiel se définit en effet très simplement et très rigoureusement et nous savons établir par le calcul, entre la quantité d'électricité et le potentiel, une relation qui nous manque lorsqu'il s'agit de la quantité de chaleur et de la température ; en d'autres termes, nous pouvons calculer la capacité électrique d'un conducteur, tandis que nous n'avons aucun moyen de déterminer par le raisonnement la valeur de sa capacité calorifique.

Pourquoi, dès lors, user de procédés artificiels et substituer, quand on peut s'en passer, des images illusoires à la réalité ? Pourquoi renverser le véritable ordre établi par la nature et considérer comme plus simple ce qui est, en vérité, plus compliqué ?

Une telle méthode ne saurait être que vaine, dangereuse même [1]. Sur l'exemple particulier que je viens de considérer, l'inexactitude de la comparaison est d'ailleurs flagrante ; il n'est pas possible d'établir un rapprochement qui se traduise par des

1. On pourrait objecter, il est vrai, qu'Ohm est parvenu à la découverte capitale des lois qui régissent la propagation des phénomènes électriques en se laissant guider par l'analogie que présente cette propagation avec le phénomène de la conduction de la chaleur. Mais cet exemple ne saurait être considéré comme une preuve bien convaincante. Ces lois furent, en effet,

relations numériques exactes entre une quantité de chaleur qui est équivalente à une quantité d'énergie, et une quantité d'électricité, qui doit être multipliée par un potentiel pour représenter un travail.

L'assimilation est donc très mal fondée et pourrait donner naissance aux erreurs les plus graves.

Ayons donc le courage intellectuel de nous mettre directement en face des choses, et regardons-les sans intermédiaire. Il ne nous faut ressentir aucune honte de notre infirmité et nous devons au contraire être fiers de pouvoir raisonner sur ce que nous ne parvenons pas à sentir. Et, puisque notre noble besoin de comprendre ne peut recevoir une entière satisfaction, ne nous contentons pas d'apparences grossières et goûtons au moins la joie délicate de prouver que, par sa propre force, notre esprit arrive presque à se débarrasser des entraves que lui a imposées la nature.

§ 3.

Que s'il s'agit d'ailleurs d'envisager plus particulièrement, comme on a le dessein de faire dans ce livre, les phénomènes qui ont reçu des applications pratiques, l'effort à faire pour saisir les principes fondamentaux est assez limité ; l'on ne peut même s'empêcher d'éprouver quelque surprise quand on constate combien peu il a été nécessaire à l'homme

trouvées d'une façon indépendante et à la suite d'expériences purement électriques par Pouillet et les raisonnements d'Oh lui-même ne s'appuient nullement sur de vagues comparaisor mais sur les résultats précis d'une théorie rationnelle que ven: d'édifier Fourier.

de connaître du monde extérieur pour le dompter et l'asservir à sa volonté.

On admire, non sans raison, toutes les précieuses conquêtes de l'industrie contemporaine et l'on s'étonne de la rapidité avec laquelle elles se sont effectuées ; peut-être pourrait-t-on être plus surpris encore que certaines d'entre elles au moins ne se soient produites qu'à une époque aussi récente.

Nos dynamos électriques ont des organismes beaucoup moins compliqués que tant d'autres machines inventées antérieurement et leur théorie, si l'on s'en tient aux choses essentielles, ne suppose que la possession de quelques principes très simples et très clairs auxquels logiquement on aurait pu parvenir beaucoup plus rapidement. Mais les applications industrielles n'ont pris leur magnifique essor que le jour où les physiciens et les ingénieurs, renonçant à des espérances chimériques, ont nettement compris que les phénomènes électriques étaient, comme les autres, commandés par les lois générales qui dominent toutes les manifestations de la nature.

Tout s'est brusquement éclairé quand, se substituant aux vagues et confuses conceptions de fluides hypothétiques, est apparu, dans sa brillante simplicité, le principe de la conservation de l'énergie.

Dès lors, au lieu d'envisager l'électricité en elle-même et de se perdre dans de stériles discussions au sujet de sa nature, on a parlé d'énergie élec-ique et l'on a étudié systématiquement les modes e production et de transformation de cette nergie.

Évidemment le mot d'énergie n'a pas suffi à faire disparaître tout le mystère : un corps électrisé (ou dans l'idée de Maxwell, le diélectrique environnant) renferme, disons-nous, de l'énergie sous forme potentielle. Que se passe-t-il dans ce corps? Nous ne saurions l'expliquer d'une façon satisfaisante. Mais que se passe-t-il donc dans ce ressort tendu qui est prêt à libérer, par sa détente, du travail mécanique lorsque nous viendrons à tirer le verrou qui le maintient. Pour quelles raisons secrètes ce mélange détonnant possède-t-il la puissance de produire de si violents effets mécaniques ou calorifiques lorsque nous en approchons cette allumette d'ordinaire inoffensive?

Ces questions sont condamnées, pour le moment au moins, à rester sans réponses et notre ignorance ne doit pas beaucoup plus nous gêner quand nous voulons utiliser l'énergie électrique qu'au moment où nous mettons en œuvre l'énergie mécanique ou l'énergie chimique.

L'essentiel est de comprendre que, dans tous les cas, l'énergie qui évolue n'a été obtenue que moyennant une dépense équivalente, qu'un opérateur a travaillé qui a chargé ce condensateur, qu'une turbine se trouve quelque part qui a fait tourner cette machine dont le courant nous éclaire.

Aussi bien, ces mots : énergie électrique, n'ont rien de vague pour un physicien, parce qu'ils correspondent à une mesure bien déterminée : l'énergie dépensée par unité de temps dans le filament de cette lampe à incandescence est le produit de l'intensité du courant qui la traverse par la différence

de potentiel maintenue aux bornes ; et nous savons dire quel sens exact nous attachons à ces diverses grandeurs, parce que nous possédons le moyen de les comparer à des unités de même espèce et d'établir entre elles et ces unités des rapports rigoureusement définis.

Il peut sembler quelque peu singulier que ce mode d'énergie qui nous est si étranger soit précisément celui dont nous attendons tant de services.

Puisqu'elle n'intéresse aucun de nos sens, cette énergie électrique, quelle part vient-elle prendre dans notre existence? En quoi la lumière peut-elle être profitable à l'aveugle? Et, en vérité, c'est un fait vraiment paradoxal et fort digne d'attention que ces manifestations de l'activité de la nature soient en même temps les plus inutiles par elles-mêmes et cependant les plus précieuses de celles que l'homme a su asservir à son usage.

Chacun sait aujourd'hui que le véritable rôle des phénomènes électriques dans l'industrie est de servir d'intermédiaires et que, dans ce rôle, ils se montrent des serviteurs commodes et fidèles. Commodes, parce que l'énergie électrique se produit aisément au dépens des autres variétés d'énergie et qu'à son tour elle nous fournit, avec une admirable facilité, la chaleur, la lumière, le travail mécanique et le travail chimique; fidèles, parce que dans ses transformations successives, ils ne retiendront rien »ur eux-mêmes et qu'ils restitueront, en principe, ute la puissance qui leur avait été confiée.

Si l'on adopte la classification, à laquelle certains ıysiciens sont amenés par des considérations tirées

du principe de Carnot, la forme électrique apparaîtra d'ailleurs comme l'une des plus nobles que puisse revêtir l'énergie; intégralement transmuable en travail mécanique, l'énergie électrique occupe, dans cette hiérarchie particulière, un rang très élevé; elle doit être rangée à côté de l'énergie cinétique elle-même.

Mais il conviendra de ne pas perdre de vue qu'elle a, comme celle-ci, une fâcheuse propension, elle peut très aisément déchoir, elle se laisse volontiers dégrader et, si l'on n'y prenait pas garde, elle retournerait tout entière à la forme vulgaire de chaleur. Contre cette tendance, il conviendra de lutter, et l'un des triomphes de l'industrie contemporaine a été précisément la découverte de moyens qui, bien entendu, n'ont pas supprimé un inconvénient inéluctable, mais qui en ont singulièrement atténué les malencontreux effets.

Ajoutons à ces incomparables qualités de l'électricité, l'exceptionnelle propriété de rapide transmission, qui, sans qu'il soit besoin de transporter un travail mécanique appréciable, permet de déclencher ou de reclencher, à grande distance et, pour ainsi dire instantanément, des mécanismes actionnés par des forces étrangères ; rappelons enfin la particulière aisance avec laquelle l'énergie électrique se peut distribuer et diviser et aussi la docilité avec laquelle elle se présente elle-même, à la volonté de l'ingénieur, sous les différentes formes qu'affectent les courants et qui sont plus ou moins avantageuses pour la solution des problèmes posés par la pratique, et nous comprendrons les raisons pour les-

quelles un si souple organisme devait nécessairement prendre une place prépondérante dans la vie de l'humanité, le jour où l'on était parvenu à le faire fonctionner.

§ 4.

Il est devenu fort banal d'expliquer de quelle manière et dans quel sens les applications de l'électricité ont bouleversé les pratiques de l'industrie et profondément modifié l'état social lui-même.

Dans ces dernières années, bien des voix éloquentes ont décrit la route parcourue depuis le jour où Volta présentait ses expériences à la première classe de l'Institut et où le premier Consul émettait cette opinion que « cette partie de la physique paraissait le chemin de grandes découvertes ».

On a célébré la façon dont, grâce à l'électricité, la pensée franchit les océans, la voix est transportée en un instant d'un bout de la France à l'autre, on a montré la lumière jaillissant de toutes parts, on a fait comprendre comment il nous était maintenant loisible de disposer de ces immenses trésors qui, sous forme de houille blanche, s'accumulent et se renouvellent sans cesse dans les pays de montagnes, comment enfin d'énormes forces, naguère inutilisées et sauvages, pouvaient aujourd'hui, domptées, assouplies, actionner dans nos vallées une armée de machines, innombrable et pacifique.

On a dit avec raison que le grand mouvement qui se produit sous nos yeux est plus et mieux qu'un progrès industriel, qu'il doit être considéré comme

un véritable progrés social, parce que le charbon, chaque jour plus rare et plus difficile à extraire, n'est plus la source principale de richesses et que, dès à présent, l'on peut prévoir que le temps approche où, au voisinage des glaciers et des chutes d'eau, se construiront de nouvelles cités ouvrières, comme autrefois s'élevèrent les villes industrielles au-dessus des bassins miniers.

Dans ces cités qui ne seront pas obscurcies par de noires fumées et qui conserveront, avec leur aspect riant et clair, le privilège de leur excellente situation hygiénique, s'établiront des ateliers familiaux où la force sera largement et libéralement distribuée.

Je n'ai certes pas le dessein de répéter ce qui, si souvent et si bien, a déjà été dit, mais je voudrais, dans ce livre, indiquer rapidement les étapes qui ont été parcourues par le physicien et qui l'ont amené en face de si graves problèmes, je voudrais surtout examiner attentivement dans quelles conditions précises ces problèmes se posent aujourd'hui.

Qu'il me soit permis cependant de rappeler à mon tour, que, pour obtenir les résultats désormais acquis, il a fallu la plus étroite collaboration du savant et de l'ingénieur.

C'est un des caractères les plus remarquables de l'évolution actuelle de la science et de l'industrie que cette fusion de plus en plus intime entre la pratique et la théorie, et ce caractère devient particulièrement saillant lorsqu'il s'agit de l'électricité.

L'industrie électrique est née, toute armée, à un moment où les esprits s'étaient libérés des supers-

titieux préjugés qui égaraient trop souvent l'artisan d'autrefois. Elle a pu, dès ses débuts, marcher allègrement, parce qu'elle n'avait pas à se débarrasser, comme tant d'autres, de l'encombrant fardeau des pratiques surannées et des recettes empiriques qui pèsent encore si lourdement sur les industries dont l'histoire remonte à un lointain passé.

Et si, dans sa marche rapide, ses premiers pas ont été guidés par la science, si, à chaque instant encore, elle a recours aux précieuses indications de la théorie, elle a largement payé sa dette de reconnaissance.

Pressé par les nécessités quotidiennes, le praticien a dû souvent trouver des solutions hardies, téméraires peut-être, qui ont un peu surpris, au premier abord, le savant habitué à une plus lente et plus méthodique discipline, mais qui ont inspiré par la suite à ce savant les plus fructueuses réflexions et l'ont conduit à de nouvelles découvertes d'une haute généralité.

Et c'est ainsi que l'étude des applications de la science, si utile d'ailleurs et si attrayante par elle-même, acquiert, pour l'histoire de l'esprit humain, une véritable importance philosophique.

CHAPITRE II

Le Magnétisme.

---

§. 1. — LES AIMANTS ET LE CHAMP MAGNÉTIQUE

S'il est vrai que dans les sciences déductives, comme les mathématiques, l'esprit humain a suivi, dans les grandes lignes au moins, une marche qui l'a mené du simple au composé, si l'on est parti de quelques idées élémentaires, pour en tirer des notions de plus en plus compliquées, il n'en a pas été de même en ce qui concerne les progrès accomplis sur le terrain des sciences de la nature.

On peut dire, au contraire, que l'on a, en général, rencontré au début des faits complexes, ceux que nos sens imparfaits nous présentaient le plus facilement, sous des apparences d'ailleurs peu conformes à la réalité objective ; ces faits semblaient tout d'abord isolés les uns des autres, puis, à force de patientes investigations, de laborieuses recherches suivies d'inductions hardies, l'on est parvenu à le réunir dans une de ces grandes synthèses qui dominent aujourd'hui nos connaissances et, alors, ce

faits, jusque là mal compris et classés dans un ordre arbitraire, sont apparus, au point de vue du plus ou moins de simplicité qu'ils présentent, dans une hiérarchie très différente de celle qu'on leur avait précédemment attribuée.

C'est ainsi que les phénomènes magnétiques et les phénomènes électriques parurent, jusqu'à la célèbre expérience d'Oersted et jusqu'aux immortelles recherches d'Ampère et d'Arago, n'avoir entre eux aucune relation.

On avait bien observé que la foudre paraissait capable d'aimanter le fer; Gassendi, par exemple, avait signalé ce fait qu'à la suite d'un orage, la tige qui soutenait la croix du clocher de Saint-Jean d'Aix-en-Provence, avait acquis des propriétés magnétiques ; on avait même constaté qu'un morceau de fer, tel qu'un clou, acquiert par la décharge d'une bouteille de Leyde, un magnétisme dont l'effet est très sensible. Mais ces remarques isolées, faites d'ailleurs à une époque relativement récente, avaient passé assez inaperçues et, même au début du siècle dernier, lorsque l'on commença à soupçonner certaines analogies entre le magnétisme et l'électricité, on continua à considérer l'aimant, dont quelques propriétés essentielles étaient connues depuis beaucoup plus longtemps, comme un ensemble singulièrement plus simple que la pile élec-rique de Volta, par exemple.

Ce n'est qu'à la suite des admirables travaux Ampère que l'idée prévalut que le phénomène ndamental est le phénomène électrique, et que

toutes les manifestations du magnétisme sont dues à des courants électriques.

S'il en était bien ainsi, dans une exposition méthodiquement enchaînée, l'étude des courants devrait précéder celle des aimants ; nous ne nous astreindrons pas cependant à suivre un ordre qui ne s'imposerait d'ailleurs qu'au cas où l'on admettrait les conceptions d'Ampère ou d'autres hypothèses équivalentes ; nous n'avons, en aucune façon, la prétention de présenter ici un traité didactique conforme aux exigences d'une rigoureuse logique. Aussi bien, pour les physiciens qui adoptent la manière de voir de Maxwell et de Hertz, la seule chose certaine est que les deux champs, électrique et magnétique, qui existent en un point de l'espace, sont dans une dépendance mutuelle très étroite, et que la variation de celui-ci entraîne nécessairement la variation de celui-là et réciproquement ; mais, à cause de cette réciprocité même, il n'y aura aucune raison valable pour considérer comme primordial l'un de ces champs plutôt que l'autre.

Dans les machines industrielles, le rôle particulier que joue l'aimantation du fer est d'ailleurs celui qui attire tout d'abord l'attention, et c'est certainement une chose très digne de remarque que ce métal, dont la découverte fut peut-être la cause des premiers progrès de l'humanité dans la voie de la civilisation, se trouve être, aujourd'hui encore, le protagoniste nécessaire dans l'admirable spectacle que nous présente l'industrie électrique contemporaine.

Que l'on réfléchisse à tout ce dont nous serions actuellement privés, si le fer n'entrait pas assez abondamment dans la composition de la terre, et l'on sentira combien notre vie matérielle et morale est dans l'étroite dépendance du sol auquel nous sommes attachés.

A quoi tient cette propriété particulière, que possède le fer, de prendre une aimantation beaucoup plus considérable que tous les autres corps ? On ne saurait encore le dire ; la question semble n'avoir pas même beaucoup préoccupé les anciens physiciens.

Durant de longs siècles, la pierre d'aimant naturelle qui attirait la limaille, ou les morceaux de fer plus ou moins purs auxquels on communiquait une propriété analogue, semblaient des espèces de jouets qui ne piquaient guère la curiosité scientifique et même, longtemps après que l'emploi de la boussole fut devenu d'un usage courant, aucune théorie sérieuse du magnétisme ne fut proposée.

Il faut arriver au temps de Descartes pour trouver un ensemble d'idées un peu cohérent sur la question. On imaginait alors, pour expliquer les phénomènes d'attraction des corps aimantés, qu'il sortait d'un aimant une sorte d'effluve de matière magnétique, dont les molécules s'accrochaient les unes aux autres ou prenaient un mouvement de recul, suivant la manière dont les effluves de deux aimants se rencontraient. On supposait qu'il y avait dans le fer quelque chose d'analogue à des valvules qui permettaient au fluide de passer dans un sens et lui refusaient au contraire le passage quand il se présentait dans le sens opposé.

Une si vague conception ne pouvait aboutir à des résultats précis ; rien n'était saisissable par le calcul, parce que l'on ne connaissait aucune donnée numérique exacte.

Aepinus est le premier qui, pour expliquer les phénomènes du magnétisme, ait employé de simples forces soumises au calcul, mais la base nécessaire faisait défaut parce que l'on ignorait encore la loi de variation des actions magnétiques suivant la distance. Cette question semble bien avoir préoccupé Newton, mais il avait conclu, des expériences fort grossières faites à son époque, que les aimants agissent l'un sur l'autre en raison inverse du cube des distances, ce qui d'ailleurs peut être exact si l'on observe, dans certaines conditions, la résultante des actions des deux pôles d'un aimant mais ce qui n'est pas l'expression de la véritable loi élémentaire.

On sait comment Coulomb, à l'aide de la balance de torsion, réussit, en employant des aimants longs et minces aimantés avec soin, à établir la loi de la force qui agit entre deux pôles magnétiques et à montrer que la répulsion qui s'exerce entre deux pôles de même nom varie en raison inverse du carré de leur distance.

Il résulte de cette loi fondamentale le moyen de parler, dans un sens précis et correct, de la *quantité* de magnétisme possédée par un pôle d'aimant, parce que cette quantité apparaît comme susceptible de mesure et que l'on peut définir en toute rigueur l'égalité et l'addition de deux quantités de magnétisme.

Du fait que l'on accorde ainsi au magnétisme le titre de quantité physique, il ne faudrait pas conclure, d'une façon hâtive, que cette quantité est, ou qu'elle n'est pas, une substance, ou qu'elle appartient à quelqu'une des espèces connues des quantités physiques. Peut-être le succès de l'hypothèse des deux fluides magnétiques a-t-il fait naître certaines erreurs sur ce sujet dans l'esprit de quelques physiciens.

On peut très bien considérer que la matière magnétique n'a, pour ainsi dire, qu'un sens purement mathématique, mais, quel que soit le nom que l'on donne à cette matière, elle ne peut manquer d'expliquer tous les phénomènes, surtout si on la doue, par définition, des propriétés nécessaires pour tenir compte des faits observés, tels, par exemple, que ceux que révèle la classique expérience de l'aimant brisé.

La parfaite conformité des expériences avec la théorie ne sera donc qu'une nouvelle confirmation des lois de Coulomb, mais ne devra être, en aucune façon, invoquée comme une preuve de l'exactitude de l'hypothèse des fluides.

Il semble bien toutefois que Coulomb et ses successeurs attribuèrent aux mots, dont ils usaient pour traduire ici leur pensée, un sens concret et que, pour eux, les fluides eurent une existence réelle. Peu importe, d'ailleurs, la langue que l'on parle si les idées exprimées sont claires et exactes.

Pour Coulomb, tous les corps magnétiques, renrment, dans chacune de leurs molécules à l'état ıturel, des quantités égales et très considérables fluide austral et de fluide boréal. Ces fluides sont

d'abord répartis uniformément, mais, sous l'influence d'une force extérieure, l'élément se divise en deux régions opposées, dans chacune desquelles l'un des fluides devient prédominant. Appliquant le calcul à cette hypothèse, Poisson a montré qu'elle rend compte de toutes les particularités de l'action réciproque des aimants ou de l'action des aimants sur le fer doux.

Ampère préférait admettre que toutes les molécules constituent autant de petits aimants permanents, primitivement orientés dans des directions quelconques de sorte que leur action extérieure est d'abord nulle, mais pouvant tourner autour de leur centre de gravité sans éprouver de résistance, s'il s'agit d'un fragment de fer doux, en éprouvant au contraire dans l'acier.

Nous verrons que cette idée reprise par Weber, puis par Maxwell, popularisée, pour ainsi dire, par Ewing permet d'interpréter la plupart des phénomènes. D'ailleurs Lord Kelvin a donné à la théorie une forme qui la rend vraiment indépendante de l'idée de fluide et, quel que soit le point de départ adopté, par le développement analytique, on parvient à des ensembles équivalents où viennent se grouper et se ranger, dans un ordre parfait, toutes les propriétés essentielles d'un aimant.

Les géomètres qui furent les premiers constructeurs de ces imposants édifices, étudiaient surtout les aimants en eux-mêmes; à leurs yeux, dans l'espace environnant, existaient seulement des centres de force agissant à distance.

A Faraday appartient incontestablement l'idée première de chercher l'origine des phénomènes magnétiques dans des actions réelles s'exerçant dans le milieu qui sépare les aimants. Pendant longtemps les physiciens s'imaginèrent à tort qu'il y avait une sorte d'incompatibilité absolue entre l'idée que Faraday se faisait ainsi des phénomènes et la méthode qu'avaient suivie les mathématiciens pour établir leurs théories. Malgré tout le respect avec lequel on envisageait les spéculations de ce grand esprit, le plus original et le plus fécond peut-être de tous ceux qui ont illustré les Sciences expérimentales au XIXe siècle, malgré la parfaite clarté que l'on se plaisait à admirer dans ses « *Recherches expérimentales sur l'électricité* », on était un peu étonné, disons même choqué, par certaines façons d'exprimer les choses qui n'étaient pas entièrement d'accord avec la forme conventionnelle de symboles mathématiques.

Maxwell a beaucoup insisté sur ce fait qu'en traduisant sous forme rigoureusement mathématique les idées de Faraday, on est, en général, amené a des conclusions tout à fait semblables, et même à des calculs identiques à ceux qu'ont développé, en partant de l'idée de fluides qui agissent à distance, Laplace, Poisson, Green et Gauss ; il dit même avec raison que plusieurs des plus fécondes méthodes de recherches découvertes par ces mathématiciens peuvent recevoir, au moyen des idées de Faraday, une forme bien préférable à leur expression primitive.

Aujourd'hui, depuis les découvertes de Hertz, l'idée directrice de Faraday a d'ailleurs triomphé ; il n'est

guère plus possible de nier, dans la propagation des actions électriques et magnétiques, le rôle essentiel des milieux intermédiaires. Quand donc on considère un aimant placé quelque part, il devient naturel d'extérioriser, en quelque sorte, le phénomène et de dire que, dans tout l'espace environnant, la présence de l'aimant a apporté une modification importante, que cet aimant a créé un *champ* autour de lui.

En quoi consiste cette modification? On ne saurait à l'heure présente le dire exactement. Aussi bien la question ne comporte peut-être pas de réponse.

Une chose seulement est certaine : le champ magnétique existe dans le vide, la modification atteint donc, tout d'abord, une substance idéale capable de remplir le vide lui-même et de pénétrer aussi les corps matériels. Il est, dès lors, assez naturel de supposer que cette substance ne doit être autre que l'éther lumineux et l'on sait que cette supposition conduit à des rapprochements remarquables entre les phénomènes de la lumière et ceux du magnétisme.

Mais on fait une hypothèse absolument gratuite lorsque l'on admet que cette modification, qui se produit ainsi dans l'éther, consiste en une modification mécanique, en une torsion par exemple. Rien ne prouve que le phénomène magnétique soit réductible à un phénomène mécanique et les images que l'on peut construire, lorsque l'on admet ce postulat, peuvent bien donner à l'esprit une apparence de satisfaction, fournir, pour ainsi dire, un support à nos pensées, mais elles sont sans doute condamnées à rester très éloignées de la réalité.

Quelle que soit la nature intime du champ magnétique, il est d'ailleurs parfaitement défini par sa propriété essentielle. Si, en un point de ce champ, on plaçait l'unité de pôle magnétique, ce pôle serait soumis à une force dont l'intensité représente la valeur de ce champ et dont la direction est la direction même du champ à l'endroit considéré.

On peut encore dire que l'on reconnaîtra qu'un espace donné est un champ magnétique, lorsqu'en plaçant en un point de cet espace une petite aiguille aimantée, librement suspendue, cette aiguille s'orientera dans une direction fixe à laquelle elle reviendra si l'on vient à l'écarter de cette position d'équilibre, par une série d'oscillations isochrones. La direction de l'aiguille, définie par la droite qui joint ses deux pôles, détermine la direction du champ en ce point, le carré du nombre d'oscillations effectuées dans l'unité de temps donne une mesure relative de l'intensité de ce champ.

Tout le monde sait que l'on possède, grâce à l'expérience bien connue des fantômes magnétiques, un moyen très commode et très saisissant de peindre, en quelque sorte, la répartition des forces magnétiques dans une section plane quelconque. Cette expérience s'explique bien simplement, chaque grain de limaille, projeté aux environs de l'aimant qui crée le champ, s'aimante par influence et devient comparable à une petite aiguille pivotant sur une de ses aspérités, et comme, d'autre part, les attractions qui s'exercent sur la limaille, tandis qu'on la projette, ont accumulé les grains en plus grand nombre là où la force a plus d'intensité, on obtient en somme

une figure telle que les grains de limaille dessinent les lignes de force, c'est-à-dire la ligne que suivrait dans le champ une particule magnétique (supposée privée d'inertie) et telle aussi que l'épaisseur des filaments donne une représentation assez approximative de l'intensité relative de la force magnétique le long de ces lignes.

Ce mode de représentation est donc fort exact ; il rend dans l'enseignement d'incontestables services et son emploi a suggéré à plusieurs praticiens de véritables découvertes. Il est utile, dans la pratique industrielle, de s'habituer à voir, pour ainsi dire, en imagination ces lignes idéales que le spectre magnétique rend tangibles. Il ne faudrait pas toutefois donner à cette expérience une extension illégitime, le flux magnétique qui traverse normalement une surface est le produit de cette surface par la valeur du champ ; il n'est, en rien, une émanation plus ou moins mystérieuse que produirait, d'une façon continue, l'aimant créateur du champ ; il nous donne seulement une sorte de mesure de la modification permanente apportée par l'aimant dans la région considérée.

§ 2. — L'AIMANTATION INDUITE.

Il n'existe probablement aucun corps qui, placé dans un champ magnétique, ne devienne un aimant, au moins d'une manière temporaire. Si l'on envisage le corps en lui-même, on dira qu'il a acquis en chacun de ses points une intensité d'aimantation qui peut être très élevée dans le fer, très faible dans

la plupart des autres substances et que l'on définira exactement comme étant le rapport du moment magnétique d'un élément de volume pris autour de ce point au volume de cet élément ; cette intensité d'aimantation sera considérée comme ayant la direction de l'axe magnétique de l'élément et sera, par suite, un vecteur bien défini.

Dans les vues modernes, on préfère considérer ce qui se passe, non plus dans le corps lui-même, mais plutôt dans le champ modifié par la présence de ce corps ; on dira alors qu'au point considéré le champ avait primitivement une certaine valeur, que cette valeur a changé, qu'elle est devenue par exemple plus grande ; cette nouvelle valeur du champ[1] est ce qu'on appelle l'induction magnétique.

Aux deux façons de voir correspondent deux quantités très importantes auxquelles Lord Kelvin a donné deux noms pittoresques devenus aujourd'hui classiques. Le rapport entre l'intensité d'aimantation et le champ s'appelle la susceptibilité du corps, le rapport entre l'induction et le champ est désigné par le mot de perméabilité. Ces deux quantités sont d'ailleurs liées par une relation très simple, elles acquièrent, l'une et l'autre, une valeur d'autant plus grande que le corps est plus magnétique, mais un corps non magnétique a une susceptibilité nulle, tandis que sa perméabilité est égale à l'unité,

1. La définition du champ en un point d'un corps magné-e est assez délicate. Il faut, pour la donner, imaginer ıutour du point considéré l'on pratique une cavité infiniment te, et, dans le cas que nous considérons, cette cavité devra ꞏ un disque infiniment plat, normal à l'aimantation.

puisque, dans ce corps, le champ garde sa valeur primitive.

Dans l'image des lignes de force, il faut concevoir que ces lignes peuvent pénétrer à l'intérieur de toutes les substances; elles conservent leur distribution initiale dans une substance qui n'est pas susceptible de s'aimanter, elles deviennent, au contraire, plus nombreuses et plus resserrées dans un aimant. Si l'on vient, par exemple, à placer un morceau de fer doux dans un champ d'abord uniforme, ce champ subit une profonde modification : presque toutes les lignes de force se rassemblent pour traverser ce morceau de fer, le flux magnétique y est maintenant bien plus considérable que dans l'espace environnant.

Dire que le fer est devenu un aimant, ou dire que les lignes de force s'y sont accumulées, c'est sans doute exprimer le même fait, mais les deux façons de parler correspondent certainement à deux façons différentes d'envisager la question, et l'on ne saurait contester que la seconde soit beaucoup mieux appropriée que la première aux phénomènes qui se produisent dans toutes les machines.

Pendant longtemps, les physiciens, qui étudiaient le magnétisme, s'occupaient principalement de l'aimantation permanente, ils envisageaient presque exclusivement les aimants qui semblaient présenter seuls un intérêt véritable; aujourd'hui, la plupart des recherches sont au contraire relatives à l'induction magnétique, à l'aimantation temporaire.

Dans l'industrie électrique, les masses de fer qu forment en quelque sorte le squelette nécessair

des machines, sont soumises à l'action d'un champ magnétique qui, en général, est périodiquement variable. De là, est venue cette orientation nouvelle de tant de travaux, de là sont sorties les études si remarquables relatives aux cycles d'aimantation et aux relations entre l'aimantation et le temps. Parmi tant d'autres, on pourrait citer cet exemple des progrès qu'à fait accomplir à la science pure la nécessité de résoudre les problèmes qui lui ont été posés par l'industrie.

Il ne devint guère possible, d'ailleurs, d'entreprendre des recherches systématiques sur la relation qui lie l'aimantation et le champ inducteur qu'à partir du jour où l'on fut en possession d'un moyen commode permettant de donner à ce champ des valeurs bien connues et variant à volonté. On le trouve, ce moyen, dans la découverte fondamentale d'Arago ; un courant crée un champ magnétique et la loi de Laplace nous apprend que ce champ est proportionnel à l'intensité du courant.

Rien n'est plus facile, dès lors, que de soumettre un morceau de fer, par exemple, à des champs dont on aura, immédiatement, au moins une mesure relative : il suffira de l'introduire dans une bobine parcourue par un courant d'intensité connue ; mais si l'on veut, d'autre part, déterminer l'induction, on rencontre des difficultés assez sérieuses qui n'ont surmontées que dans ces dernières années.

ıes procédés de mesure employés sont assez ɜrs ; les uns, comme la méthode du magnétomètre, la méthode balistique, conviennent au cas où la

valeur du champ varie assez lentement; les autres, comme la méthode de J. et B. Hopkinson, permettent d'opérer dans des conditions semblables à celles que l'on rencontre dans l'industrie, où les cycles d'aimantation sont très rapidement parcourus. Il existe aussi des instruments donnant un tracé automatique de la courbe qui représente la variation de l'aimantation en fonction du champ ou bien encore conduisant à une construction par points de cette courbe au moyen de simples lectures; ainsi sont, par exemple, le magnétographe d'Ewing ou l'appareil de Siemens et Halske. D'autres dispositifs enfin, tout en donnant des résultats encore fort précis, conviennent par la facilité et la commodité de leur emploi à la pratique industrielle: ce sont les perméamètres, par exemple le perméamètre de S.-P. Thompson, ou encore les balances magnétiques, comme celle de Du Bois.

Grâce à ces instruments, la mesure de la perméabilité du fer employé dans les constructions électriques est devenue une opération courante; cette perméabilité change d'une façon très marquée avec les divers échantillons, mais on peut néanmoins énoncer à son sujet quelques résultats généraux.

Dans les débuts, on avait cru que l'aimantation était très sensiblement proportionnelle au champ, en d'autres termes que la perméabilité était indépendante du champ. Tel était le résultat de fort intéressantes expériences effectuées, dès 1844, par Lenz et Jacobi [1], mais on ne tarda pas à reconnaître

1. Dans ces curieuses expériences, l'une des préoccupations des deux habiles physiciens était de montrer qu'il n'existe aucun

que cette loi de proportionnalité n'était qu'une loi empirique qui s'éloignait de plus en plus de la vérité, au fur et à mesure que le champ prenait des valeurs plus considérables. Müller démontra qu'il y a, pour chaque barreau de fer doux, un maximum d'aimantation que ce barreau ne peut dépasser, et cette conclusion est en évidente contradiction avec l'hypothèse de la constance de la perméabilité, puisque, si cette hypothèse était exacte, l'aimantation pourrait augmenter sans limite.

De multiples travaux ont permis d'élucider à peu près complètement la question : on sait aujourd'hui que, dans le fer, la perméabilité croît d'abord avec le champ, atteint un maximum qui correspond, en général, à une valeur du champ de quelques unités seulement, puis décroît ensuite lentement en tendant vers l'unité. Ainsi donc, une armature magnétique finit par perdre sa propriété spéciale dans des champs très intenses et joue alors le même rôle passif que remplissent, pour les champs de toutes valeurs, les substances non magnétiques.

Les parties les plus délicates de ces études sont celles qui sont relatives aux champs les plus faibles, à cause de la petitesse des effets à observer ; et

coefficient spécifique de magnétisation relativement aux diverses substances qui peuvent former le fil conducteur de la bobine magnétisante ; en d'autres termes, que l'aimantation produite ne dépendait que de la valeur du champ et non de la nature des corps qui créent ce champ. La question peut nous sembler assez inutile, parce qu'elle ne se pose plus si nous envisageons les choses point de vue actuel, mais elle a eu son intérêt et, *a priori*, réponse n'était pas évidente. Il est toujours instructif de peler par quels chemins compliqués on a dû passer avant trouver la voie la plus simple pour parvenir à la vérité.

d'autre part, celles qui concernent l'autre extrémité de la courbe, la région de saturation, à cause de la difficulté qu'il y a à obtenir des champs très intenses suffisamment étendus et à les mesurer.

M. Ewing, M. Weiss, M. Du Bois et d'autres auteurs qui ont fait des expériences particulièrement soignées sur la question, ont obtenu des résultats aussi concordants que le comporte la diversité des fers employés.

Ce n'est pas seulement dans la région même où la substance magnétique est placée que le champ va être modifié par son introduction ; le corps, plus perméable que le milieu ambiant, absorbera un grand nombre de lignes de forces et, par suite, altérera la densité de celles de ces lignes qui subsistent à l'extérieur.

Par exemple, un barreau court, placé dans un champ uniforme parallèle à son axe, augmentera le champ au voisinage de ses extrémités, mais le diminuera partout ailleurs, puisque les pôles créés dans ce barreau donnent naissance eux-mêmes à un champ de sens contraire au champ primitif ; ce nouveau champ s'appelle un champ démagnétisant.

L'existence d'un tel champ a un intérêt particulier, parce qu'il permet de protéger un espace déterminé contre l'influence d'un champ magnétique ; il suffit, à cet effet, d'entourer cet espace d'un noyau qui s'aimante de telle façon que cette aimantation produise un champ égal et de signe contraire au champ primitif. Ainsi l'on parvient, à laide d'un cylindre creux formant écran magné-

tique, à protéger des instruments de mesure contre des champs dont la direction serait normale aux génératrices de ce cylindre ; ainsi encore, on empêche, comme nous le verrons plus loin, la production gênante de phénomènes secondaires dans les dynamos en noyant dans une armature magnétique les tiges conductrices de l'induit.

La considération du champ démagnétisant a, d'ailleurs, permis d'élucider d'autres questions restées longtemps obscures ; ainsi, par exemple, elle nous fait bien comprendre pourquoi l'aimantation permanente se conserve mieux dans un circuit magnétique fermé que dans un circuit ouvert, et aussi, comme l'ont montré M. Kirstaedter et M. Ascoli, la véritable raison pour laquelle la forme lamellaire, proposée autrefois par Jamin à la suite de remarques incomplètes et même partiellement inexactes, convient particulièrement bien lorsqu'il s'agit d'obtenir des barreaux puissamment aimantés.

On a fait ainsi de nombreuses recherches relatives à l'aimantation permanente et l'on connaît aujourd'hui d'une façon précise, grâce aux travaux de MM. Bouty, du Bois, Taylor, etc., et de M[me] P. Curie, quelles sont les meilleures conditions à remplir pour avoir un aimant intense et constant.

L'étude des relations qui existent entre l'ai-
antation et le temps est l'une des plus intéres-
antes et des plus utiles, mais aussi l'une des plus
fficiles, qui se puisse faire au sujet du magné-
me.

M. Warburg revendique avec raison l'honneur d'avoir le premier, en 1880, montré que si l'on soumet un fil de fer à un champ magnétique croissant de zéro à une certaine valeur H, puis décroissant de H à zéro, pour le même champ, l'intensité d'aimentation est plus grande lorsque le champ décroît que lorsqu'il croît, et que, lorsqu'on a répété cette opération plusieurs fois, la représentation graphique de l'intensité en fonction du champ donne une courbe fermée.

Mais c'est Ewing qui, par ses importants travaux, a contribué pour la plus grande part à fixer nos connaissances sur ce sujet et qui a donné à ces phénomènes, où apparaît nettement un *retard* de l'effet sur la cause, le nom expressif, universellement adopté aujourd'hui, d'hystérésis.

Ewing a étudié, dans tous leurs détails complexes, ces faits remarquables; tout le monde sait ce que l'on entend par un cycle d'aimantation, et l'on connaît la forme de la courbe d'hystérésis correspondant à des variations alternatives d'un champ décroissant depuis une certaine valeur H jusqu'à une valeur égale et de signe contraire — H, pour croître ensuite depuis —H jusqu'à + H; mais il est rare que les choses se présentent d'une façon aussi simple. D'autres phénomènes viennent se superposer au phénomène principal et ne doivent pas être confondus avec lui; ainsi, le phénomène du *traînage magnétique*, particulièrement sensible dans le cas des champs faibles, et qui consiste en ce que l'aimantation met un certain temps avant de prendre la valeur qui correspond à la nouvelle valeur du

champ, ainsi encore les phénomènes dus aux courants induits très importants quand les variations du champ sont très fréquentes.

On ne peut que mentionner ici les recherches qui, après celles d'Ewing, ont permis de débrouiller un peu cet ensemble si complexe, Lord Rayleigh, J. Hopkinson, M. Schmidt, M. Wilson, M. Weihe ont habilement travaillé à cette œuvre difficile; il convient de citer aussi, d'une façon spéciale, M. Maurain qui, dans des recherches très ingénieuses et conduites avec une méthode remarquable, a obtenu des résultats fort nets relativement à l'influence de la vitesse de variation du champ sur la forme des courbes d'aimantation.

Les phénomènes d'hystérèse ont, dans l'industrie, une grande importance parce qu'ils entraînent une dissipation d'énergie sous forme de chaleur et qu'ils sont ainsi la principale cause de diminution du rendement des machines. M. Warburg avait déjà montré que l'aire de la courbe fermée d'aimantation mesure l'énergie dissipée pendant une période du champ. C'est donc en se plaçant dans des conditions où cette aire sera la plus petite possible que l'on obtiendra le meilleur rendement, et c'est en étudiant la courbe d'aimantation que l'on pourra évaluer l'énergie perdue.

Il convient d'ailleurs d'examiner de très près la question si l'on veut arriver à des conclusions absolument correctes ; de nombreuses expériences ont été faites dont on ne saurait tirer aucun résultat précis, parce que l'on a souvent négligé, comme l'a fait observer M. Maurain, de tenir un compte suffi-

sant du rôle si complexe que jouent dans les noyaux magnétiques, les courants induits.

En pratique, on a une mesure suffisamment approchée de l'énergie dissipée pendant un cycle complet, en mesurant seulement les intensités d'aimantation extrêmes, et en déterminant, pour chaque échantillon, un coefficient spécifique. M. Steinmetz a, en effet, indiqué, en 1892, une formule célèbre qui permettrait, au moyen de ces données, de calculer la perte d'énergie.

La formule ne doit d'ailleurs être considérée que comme approchée et empirique ; divers auteurs M. Ewing, Miss Klaessen, etc., ont montré qu'elle peut conduire à des résultats inexacts, surtout pour les champs très faibles ; M. Weiss a indiqué, à la suite de très intéressantes expériences, comment elle devait être modifiée pour représenter, par exemple, les faits qu'il avait observés dans le cas des alliages de fer et d'antimoine.

Il existe d'ailleurs des appareils divers dus à MM. Ewing, Holden, Marcel Deprez, Blondel, appelés hystérésimètres et qui donnent, par une simple lecture, une valeur assez exacte de l'énergie qui se perd, par l'hystérésis, au sein de noyaux placés dans des conditions semblables à celles où ils se trouvent dans les dynamos en marche.

§ 3. — PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DES DIVERSES SUBSTANCES

Dans le vide, il peut exister des lignes de force magnétiques ; le vide, ou si l'on préfère l'éther, doit, en conséquence, être considéré comme magnétique ;

mais on convient, d'une manière tout à fait arbitraire d'ailleurs, de prendre la perméabilité du vide comme égale à l'unité ou, ce qui revient au même, sa susceptibilité égale à zéro et, de par cette convention, l'on doit dire qu'un espace donné, pris dans l'éther libre, ne peut acquérir aucune aimantation.

Il n'en est pas de même pour les substances pondérables ; on est fondé à croire que la matière a toujours une perméabilité différente de l'unité, ou bien, si l'on veut attribuer le phénomène à l'éther, que l'éther, en pénétrant dans la matière, change toujours de perméabilité.

On a remarqué, il y a fort longtemps, que divers composés du fer, possèdent comme la pierre d'aimant ou le fer lui-même, des propriétés magnétiques. En 1778, Brugmans écrivait : « *Omne ferrum, omneque corpus ferrum continens, eo ipso dum trahitur, polos recipiat* ». Ce même expérimentateur remarquait d'ailleurs qu'un morceau de bismuth s'orientait en sens inverse d'un morceau de fer quand on les présentait l'un et l'autre à un aimant. Un peu plus tard, on découvrait que le nickel et le cobalt, privés de fer par des chimistes tels que Vauquelin, Thénard, Laugier et Wenzel, conservaient néanmoins la faculté de s'aimanter d'une manière très notable et l'on parvenait ainsi à cette idée que la prérogative tout d'abord accordée au fer seul pouvait bien, en réalité, être une propriété générale de la matière. C'est Faraday qui, au milieu du siècle dernier, vint par ses expériences classiques justifier définitivement cette idée et démontrer que toute

matière diffère du vide au point de vue magnétique.

Depuis lors, de nombreuses mesures ont été effectuées, elles ont conduit à classer les corps en trois groupes distincts : les corps ferromagnétiques, les corps paramagnétiques et les corps diamagnétiques. Il faut bien se garder d'ailleurs d'attribuer à cette classification une valeur absolue, elle n'a qu'une utilité pratique, il n'existe, entre les divers groupes, aucune délimitation parfaitement nette, et, nous le verrons, des variations de température suffisent pour permettre entre eux une transition continue.

Les substances ferromagnétiques ont une perméabilité considérable et présentent d'une façon marquée le phénomène de l'hystérèse.

De tous les corps, le plus sensible à l'action magnétique est le fer que l'on appelle le fer doux parce qu'il est facile à travailler; c'est du fer à peu près pur qui n'a subi aucune altération après avoir été porté au rouge; mais les moindres traces de substances étrangères, les plus légers changements dans les propriétés physiques, par exemple la légère modification que produit une flexion, en font varier les propriétés magnétiques dans des proportions si considérables qu'il est à peu près impossible de donner des valeurs numériques de l'aimantation.

Disons cependant que, pour cette substance, la courbe d'hystérésis est peu développée et que le champ coercitif (c'est-à-dire la valeur du champ pour laquelle s'annule l'intensité d'aimantation quand on soumet le fer à un cycle d'aimantation) est

remarquablement faible. La perméabilité est, comme toujours, très variable avec le champ, le maximum, généralement très accusé, est atteint pour un champ de quelques unités, on a étudié des fers pour lesquels la perméabilité maxima atteignait presque 5.500. Lorsque l'on soumet un fer doux à des actions mécaniques, il devient difficile à travailler, il se transforme en fer dur ; en général, la perméabilité diminue au fur et à mesure que le fer durcit, il obéit moins au champ, le champ coercitif acquiert des valeurs plus considérables. En étudiant un fil de fer doux, Ewing a pu faire baisser sa perméabilité maxima de 3.080 à 670.

L'union du carbone au fer modifie profondément les propriétés magnétiques, mais l'état physique, sous lequel le métal a été obtenu, joue ici un rôle aussi considérable que la composition même de ce métal. Sous le nom d'acier on désigne, on le sait, des composés de fer et de carbone contenant depuis un dixième jusqu'à deux pour cent de carbone, l'acier doux, le moins riche en carbone, ne se distingue donc guère, au point de vue de la composition, du fer presque pur; la différence provient surtout de la façon dont il a été obtenu ; l'acier étant en général fondu et moulé tandis que le fer se présente en pièces forgées et soudées.

L'acier doux peut atteindre à peu près la même aimantation maximum que le fer mais il y arrive ıucoup plus lentement ; la différence la plus mar-ée est qu'ici le champ coercitif a une valeur con-.érable, trente ou quarante fois celle que l'on ren-ntre dans le fer doux, on augmente d'ailleurs

beaucoup ce champ coercitif, tandis qu'on diminue la perméabilité, par l'écrouissage.

Lorsque la proportion de carbone croît, les propriétés magnétiques décroissent; la trempe acquiert une grande influence, elle élargit le cycle d'aimantation, agrandit le champ coercitif.

On n'utilise guère les métaux qui contiennent entre 2 et 3 pour cent de carbone ; au delà de cette proportion, on a ce que l'on appelle les fontes, en général moins perméables que l'acier doux, quoique certains produits des usines Krupp aient une perméabilité considérable et un champ coercitif faible.

On a beaucoup étudié, en ces dernières années, à divers points de vue, les alliages de fer et d'autres métaux, mais le nombre des combinaisons possibles étant presque illimité, ces études, pourtant si abondantes, ne sont qu'une première étape dans une voie qui sera sans doute fort longue à parcourir.

Le chrome et surtout le molybdène et le tungstène n'ont qu'une influence assez faible sur l'aimantation même (ils la diminuent légèrement) mais ils augmentent dans une forte proportion le champ coercitif ; le manganèse, comme l'ont montré divers auteurs, et particulièrement Hopkinson, a une influence très fâcheuse, il fait presque perdre au fer ses propriétés magnétiques.

Des résultats particulièrement intéressants, parce qu'ils constituent un ensemble très cohérent de recherches, ont été obtenus par M. Weiss relativement aux alliages de fer et d'antimoine ; cet habil physicien a étudié la variation de l'aimantation ave

la composition et il a montré que la perméabilité, très faible pour tous les alliages, diminuait brusquement pour une proportion d'antimoine de 40 pour cent environ. On doit aussi faire mention à part des ferronickels qui, à cause des singularités si remarquables découvertes par M. Ch. Ed. Guillaume dans leurs propriétés mécaniques et thermiques, sont appelés à jouer un rôle industriel de plus en plus considérable. D'une manière générale, on peut dire que ces alliages se comportent, au point de vue magnétique, comme on le peut prévoir d'après la classification qui résulte des belles recherches, désormais classiques, de M. Guillaume.

Si l'on n'est pas arrivé encore à lier par un enchaînement logique ce faisceau un peu éparpillé de travaux particuliers, l'on peut au moins, de ces études, tirer, dès à présent, de très importantes conclusions pour les constructions industrielles.

On comprend bien désormais qu'il n'est pas indifférent, dans les divers cas qui se présentent pour les applications pratiques, d'employer au hasard un échantillon de fer.

Veut-on, par exemple, construire un inducteur de dynamo, c'est-à-dire un organe capable de produire un flux magnétique fixe : il conviendra évidemment d'avoir une haute perméabilité, tandis que l'hystérésis n'aura qu'une médiocre influence, et l'on s'adressera à de l'acier coulé dans des conditions déterminées.

S'agit-il, au contraire, d'établir un induit : une grande perméabilité aura moins d'importance parce que la dépense d'excitation nécessaire pour aiman-

ter un induit n'est qu'une très faible fraction de la dépense d'excitation totale, mais, en revanche, il importera, au plus haut point, de diminuer l'hystérésis ; il faudra, dans ce cas, prendre des tôles convenablement recuites ; remarquons toutefois que ces tôles elles-mêmes peuvent perdre petit à petit leur valeur par l'usage, elles vieillissent, suivant l'expression consacrée.

Désire-t-on, enfin, avoir un aimant permanent, et surtout un aimant constant : on devra alors s'attacher à réaliser une grande force coercitive. Mme Curie, qui a parfaitement étudié cette importante question, a montré qu'il convenait de s'adresser à des aciers contenant 1,2 pour cent de carbone, que le molybdène améliorait encore le champ coercitif et enfin que la trempe devait être faite à haute température. En observant toutes ces prescriptions, Mme Curie a obtenu des aimants qui ont conservé, pendant plus de quinze mois, une aimantation qui n'a jamais varié de plus d'un trois centième de sa valeur.

Parmi les substances ferromagnétiques, il faut classer certains composés naturels du fer et, tout d'abord, cette magnétite dont la plus haute antiquité a connu l'aimantation. Ce minéral cristallise dans le système cubique et l'on aurait pu croire qu'il présentait, par suite, les mêmes propriétés magnétiques dans toutes les directions. M. Abt, et M. Du Bois avaient déja signalé certaines particularités curieuses de l'aimantation des cristaux de magnétite, mais la question a surtout été approfondie, dans un beau travail, par M. P. Weiss ; cet habile physicien a montré que les courbes d'aimantation présentent

des différences nettement caractérisées suivant la direction des divers axes de symétrie mais compatibles d'ailleurs avec le mode de symétrie.

D'autres recherches, également très intéressantes, ont été faites sur l'hématite et sur la pyrrohitine ; en 1882, M. Streng avait déja signalé ce fait que cette dernière substance « refuse la polarité magnétique selon la direction de l'axe normal à la base hexagonale et se comporte comme l'acier suivant toutes les orientations du plan de la base. » Mais les expériences de ce savant étaient fort incomplètes, elles étaient relatives au seul magnétisme rémanent et avaient un caractère uniquement qualitatif. C'est certainement à M. Weiss que revient l'honneur d'avoir nettement mis en évidence que la pyrrohitine n'est susceptible de s'aimanter que dans un certain plan, de sorte que l'aimantation, dans une direction normale à ce plan, est impossible. M. Weiss a fait une étude très complète de la question et, par de très élégantes expériences, il a mis hors de doute ce fait singulier dont l'importance pour les théories de la cristallisation et pour celles du magnétisme doit être considérable.

Ces substances minérales, où les propriétés magnétiques s'atténuent, permettent, en quelque sorte, de passer d'une manière continue des corps ferromagnétiques aux corps paramagnétiques chez qui le magnétisme est beaucoup plus faible, qui ne présentent point d'hystérésis, et qui ont une perméabilité presque rigoureusement constante.

Beaucoup d'expériences sur les substances para-

magnétiques ont été faussées par la présence de quelques traces de fer; pour la plupart d'entre elles la susceptibilité est de l'ordre d'un millionième, il suffit par conséquent de 1/500 pour cent de fer métallique pour masquer complètement les propriétés magnétiques que l'on voudrait étudier et une telle proportion de fer est assez fréquente dans la plupart des métaux.

L'erreur ira d'ailleurs en diminuant, si l'on opère dans des champs intenses où la perméabilité du fer perd de son importance ; il y aura donc intérêt, à tous égards, à placer la substance entre les pôles d'un de ces puissants électro-aimants que l'on sait construire depuis les travaux de M. Weiss et de M. Du Bois. On constatera ainsi qu'un nombre considérable de corps simples et composés sont paramagnétiques, mais on ne peut encore énoncer aucune relation entre les propriétés magnétiques et la composition moléculaire.

Nous avons vu que l'on a signalé, il y a déjà près de cent cinquante ans, le fait que le bismuth s'aimante en sens inverse du champ; cette propriété n'est pas spéciale à ce corps, elle paraît même fort générale; le diamagnétisme se manifeste chez beaucoup de substances. Il importe cependant de remarquer que l'air étant paramagnétique, un corps, moins magnétique que lui, semblera diamagnétique dans l'air ambiant, tandis qu'en réalité, placé dans le vide, il apparaîtrait faiblement paramagnétique.

On n'a, jusqu'à présent, trouvé aucune loi qui

permette de prévoir si un composé de substances dont le magnétisme est connu sera para ou diamagnétique et l'on ne pourrait donner sur le sujet que des renseignements purement empiriques et ne présentant, par suite, aucun intérêt général. Il convient cependant de signaler des expériences récentes, particulièrement soignées, de M. Meslin, qui jettent quelque jour sur la question parce qu'elles fixent des points de repère précis dans l'échelle diamagnétique.

§ 4. — RELATIONS ENTRE LES PHÉNOMÈNES MAGNÉTIQUES ET D'AUTRES PHÉNOMÈNES [1].

Les diverses modifications physiques que peut subir un corps, influent sur ses propriétés magnétiques; parmi ces actions l'une des plus importantes, tant au point de vue théorique qu'au point de vue pratique, est incontestablement celle qu'exercent les changements de température.

Depuis longtemps, l'on sait qu'un aimant porté au rouge perd sa vertu magnétique et la liste est longue des recherches consacrées à ce sujet depuis celles de Gilbert et celles de Coulomb. Dans ces dernières années l'on peut citer les travaux de MM. Ewing, Berson, Ledeboer, Le Chatelier, etc., mais l'ensemble le plus important est celui qu'a

1. Je laisse ici entièrement de côté les actions si remarquables qu'exerce le champ magnétique sur les propriétés optiques des corps, ces actions ont donné lieu, en ces dernières années, à des travaux d'une grande importance et ont suggéré des théories du plus haut intérêt, mais j'ai exposé ces questions dans mon livre *la Physique moderne*.

publié, en 1895, P. Curie. Là, comme dans toutes ses autres œuvres, l'admirable physicien a laissé la marque puissante de son pénétrant et profond génie; les expériences de Curie ont été faites par une méthode extrêmement ingénieuse et précise, les corps étaient chauffés par un petit four électrique et leurs propriétés magnétiques mesurées par un procédé très original.

Curie a découvert ce fait capital qu'à partir d'une certaine température, dite température de transformation, tous les corps ferromagnétiques se comportent à la façon des corps paramagnétiques, leur perméabilité devient, pour une température fixe, indépendante du champ. Pour le fer cette température de transformation est voisine de 750°, pour la magnétite elle est de 535°.

On a constaté une discontinuité brusque, à cette même température de 750°, dans les autres propriétés du fer, par exemple, comme l'a mis en évidence très habilement M. Pionchon, dans sa chaleur spécifique; toutes ces variations semblent donc correspondre à un véritable changement d'état; d'ailleurs, pour le fer, ce changement ne serait pas unique, Curie, poursuivant ses expériences à des températures plus élevées, notait encore deux nouvelles transformations à 950° et à 1.280°.

Pour les corps paramagnétiques très nombreux qu'il a pu étudier, Curie est arrivé à une loi fort importante à laquelle les physiciens ont très justement donné son nom; il a démontré que la susceptibilité magnétique variait en raison inverse de la température absolue. Cette loi se vérifie très exac-

tement, aussi bien pour des métaux solides tels que le palladium, que pour des gaz comme l'oxygène. MM. Fleming et Dewar qui ont fait des expériences, pour ainsi dire complémentaires de celles de Curie, en étudiant le magnétisme dans un vaste intervalle de température mais pris de l'autre côté de l'échelle, depuis la glace fondante jusqu'à l'air liquide bouillant, ont confirmé l'exactitude de la loi de Curie aux basses températures.

Enfin Curie a aussi étudié les corps diamagnétiques, il a montré que, pour eux (sauf pour le bismuth et l'antimoine qui font exception) les coefficients d'aimantation restent constants quand le champ varie et aussi quand la température s'élève. Les changements d'état physique ou les changements allotropiques n'ont qu'une très médiocre influence sur les propriétés diamagnétiques qui paraissent ainsi ne dépendre que de l'état des dernières particules de la matière et non de leur arrangement.

Les efforts mécaniques exercent une action très marquée sur l'aimantation des corps ferromagnétiques ; mais quand on sait combien peu encore sont précises nos connaissances sur les propriétés mécaniques des solides, on ne saurait s'étonner que malgré d'importants travaux, nous ne soyons que peu avancés dans l'étude de cette question complexe; on a constaté, par exemple, que par l'effet d'une traction faible et constante, l'aimantation du fer croît jusqu'à un maximum qu'elle atteint pour un certain champ critique ; puis elle diminue

ensuite et devient plus faible que si la traction n'existait pas ; on sait aussi que si un fil aimanté longitudinalement vient à être tordu, il acquiert une aimantation circulaire, et qu'au contraire un fil aimanté circulairement s'aimante longitudinalement quand on le tord.

Sur tous ces phénomènes et sur beaucoup d'autres analogues, on ne possède que des vues particulières ; il faudrait sans doute, pour avoir une idée d'ensemble, comprendre mieux qu'aujourd'hui, comment se constituent les noyaux magnétiques. Peut-être un jour, des recherches comme celles de M. Houllevigue, ou celles de M. Maurain sur l'aimantation du fer obtenu dans l'électrolyse et par suite, déposé peut-on dire, molécule par molécule dans un champ magnétique, nous fourniront-elles des renseignements précieux sur le sujet.

Parmi les actions intéressantes qui se peuvent exercer sur l'aimantation, il en est une qui a reçu une application fort importante, je veux parler de l'action des oscillations électriques, utilisée par M. Marconi, qui, à la suite des recherches de M. Rutherford, a pu remplacer avec avantage dans la télégraphie sans fil, le tube de Branly par des détecteurs magnétiques.

Les effets produits par les oscillations sont fort complexes, mais ils se comprennent cependant mieux en principe que d'autres qui paraissent tout d'abord plus simples ; ils tiennent, en effet, d'une façon évidente à de nouvelles aimantations produites par la variation du champ.

Il y a fort longtemps que l'on a commencé à étudier les phénomènes d'aimantation par décharges oscillantes; dans ces dernières années, MM. J.-J. Thomson, Pellat, Bjerknes, Klemencic, etc., ont publié sur le sujet de remarquables mémoires. Plus récemment, MM. Tissot, Piola, Lori, Eules, etc., ont fait voir comment les oscillations peuvent agir sur les coefficients d'aimantation, ou sur l'hystérésis magnétique; dans un travail tout récent, M. Maurain est parvenu à montrer comment, chaque fois que les oscillations électriques agissent sur l'aimantation dans des conditions nettes, on peut prévoir le sens de leur action, et ce très habile physicien a réussi à donner, par une analyse serrée de la question, des règles précises permettant de calculer quantitativement cette action.

Si les propriétés magnétiques dépendent des modifications physiques, on peut penser que, réciproquement, les diverses propriétés d'une substance seront altérées par l'aimantation, et la liste est longue, en effet, de ces variations produites par le magnétisme : modification de la résistance électrique, modification des phénomènes thermoélectriques étudiées d'abord par lord Kelvin, puis par M. Houllevigue, modifications mécaniques très nombreuses, etc., etc.

Parmi ces dernières, on s'est spécialement occupé des changements de dimensions et de densité qu'éprouvent les corps magnétiques sous l'influence d'un champ ; ce sont les phénomènes que l'on appelle les phénomènes de magnétostriction ; ils ont fait, en

particulier, l'objet de très belles recherches dues à un physicien japonais, M. Nagaoka, qui a réussi à montrer comment l'application des principes de la thermodynamique permettaient de trouver d'intéressantes relations entre les déformations produites par l'aimantation et l'influence des effets mécaniques sur l'aimantation.

C'est également par des considérations théoriques empruntées à la thermodynamique que M. Janet établit, le premier, qu'un corps magnétique doit, par l'aimantation, devenir moins attaquable par les acides qu'à l'état neutre ; et ce savant physicien, s'appuyant sur ce fait que les forces électromotrices servent, en quelque sorte, de mesure aux réactions chimiques, prévoyait que, d'une manière générale, le fer le plus aimanté serait, dans un élément de pile, positif par rapport à celui qui l'est moins.

Ces conclusions théoriques, généralisées par M. Duhem, ont été vérifiées par divers expérimentateurs, MM. Lala et Fournier, M. Paillot et surtout par M. Hurmuzescu qui a fait, sur le sujet, un très bel ensemble de recherches.

Ainsi, le magnétisme intervient dans les réactions chimiques; un chimiste américain, M. Ramsen, puis M. Colardeau, avaient d'ailleurs observé des phénomènes qui mettaient en évidence cette intervention ; mais elle est devenue, depuis le travail de M. Janet, l'une de celles que le calcul permet le mieux de prévoir.

La grande généralité des actions magnétiques et le rôle qu'elles exercent sur les phénomènes chimiques pourraient donner à penser qu'elles doivent

amener une perturbation des fonctions vitales chez les organismes inférieurs. Cette idée paraît d'autant plus plausible que M. O. Lehmann a démontré que, dans les célèbres cristaux mous ou liquides qu'il a découverts, se manifestent des tendances marquées à des orientations déterminées sous l'influence d'un champ magnétique.

Mais M. Du Bois n'a pu, même dans un champ atteignant une valeur de plus de 50.000 unités, observer aucun effet perceptible ni sur des protozoaires, ni sur des diatomées. Il est donc à peu près certain que les organismes primitifs n'éprouvent aucune sensation magnétique, et, quoiqu'il ne soit pas absurde de supposer, comme le font quelques personnes, que des animaux supérieurs, comme le pigeon voyageur, ont des impressions magnétiques qu'ils utilisent pour trouver une direction, la chose paraît du moins assez invraisemblable. Nous pouvons, d'ailleurs, être très étonnés de ne pas posséder un sens magnétique, quand nous constatons combien nombreuses sont les actions du magnétisme et lord Kelvin a même dit, très justement, que l'absence d'un tel sens est une véritable merveille.

§ 5. — THÉORIES DU MAGNÉTISME.

Tous ces changements mécaniques et physiques, qu'éprouvent les corps magnétiques par l'aimantaon, paraissent bien dus à une modification subie r la molécule elle-même et il est naturel de penr que l'effet élémentaire doit être une orientation cette molécule.

On est ainsi ramené, par l'étude complète des phénomènes, à l'idée fondamentale dont nous étions partis, idée émise tout d'abord, avons-nous dit, par Ampère, puis précisée par Weber, Maxwell, Ewing, etc., etc.

Si cette vue est exacte, on doit pouvoir expliquer les différences de propriétés entre l'acier et le fer doux par des différences d'orientation des molécules et, par suite, par des différences de structure. M. Bouty avait déjà remarqué que l'indépendance relative de l'aimantation temporaire et de l'aimantation permanente faisait prévoir l'hétérogénéité de la structure de l'acier, mais on est aujourd'hui en possession d'une méthode qui permet des observations faciles et directes, c'est l'étude microscopique qui a rendu de si grands services à la métallurgie et qui, au point de vue scientique, fournit les plus précieux renseignements.

L'examen micrographique des aciers permet maintenant de suivre les transformations de structure, et conduit à distinguer dans le fer des états différents. En réunissant toutes les données acquises, M. Osmond est parvenu à les grouper dans une théorie d'ensemble qui donne, pour le moins, une image très exacte de la réalité.

Dans le fer il y aurait lieu de considérer divers états ; d'abord le fer α, magnétique, stable à la température ordinaire, ne dissolvant pas le carbone et ne possédant pas de pouvoir coercitif, puis le fer γ, non magnétique, stable aux très hautes et aux très basses températures seulement et pouvant dissoudre le carbone ; quand ce fer γ renferme quelques

faibles quantités de carbone ou de métaux tels que le manganèse ou le tungstène, il acquiert de la stabilité aux températures ordinaires.

Au-dessous de 700° un échantillon de fer doit être considéré comme constitué par une sorte de réseau à mailles serrées formé de composés définis tels que la cémentite (carbure de fer répondant à la formule Fe^3C) et de fer γ ; dans ce réseau se trouvent emprisonnées des molécules de fer α.

Vient-on à introduire cet échantillon dans un champ magnétique, les particules α deviennent des aimants très petits qui cherchent à s'orienter dans la direction du champ, mais leurs liaisons aux éléments du réseau forment une résistance, d'où la force coercitive, et les empêchent, d'autre part, de revenir à leur position première quand le champ s'annulera d'où l'hystérèse et l'aimantation permanente.

On comprend qu'il doit exister une saturation, puisqu'un noyau magnétique ne saurait évidemment posséder une aimantation plus grande que celle qu'il acquiert quand tous ses aimants moléculaires auront pris la direction du champ magnétisant ; l'on s'explique également l'influence des flexions qui déchirent par place le réseau de fer γ et diminuent, par suite, le magnétisme rémanent ; l'on aperçoit aussi le rôle de la trempe qui saisit, en quelque sorte, le fer dans l'état γ non magnétique pour mener dans un état de faux équilibre sans qu'il pu se transformer aux températures ordinaires, l'on se rend compte enfin de l'action du recuit ii, effectué à une température inférieure à la tem-

pérature critique, laisse s'opérer une rétrogradation plus ou moins complète et détruit ainsi partiellement l'effet de la trempe.

En réalité, pour interpréter toutes les particularités si complexes que présentent les aciers, il faut encore introduire d'autres variétés telles que le fer β, stable seulement dans un intervalle de température très restreint entre 700° et 800°, non magnétique, ne dissolvant pas le carbone et considérer aussi des composés tels que la martensite, etc.

Les belles recherches de M. Osmond jettent un jour puissant sur le problème si compliqué de l'aimantation, mais elles n'épuisent pas le sujet au point de vue du physicien. On peut chercher la nature des liaisons qui agissent sur les particules aimantées; Ewing, pour les expliquer, faisait seulement intervenir les actions magnétiques des aimants moléculaires les uns sur les autres et il parvenait ainsi à interpréter complètement l'allure des courbes d'aimantation ; mais, dans cette manière de voir, on comprend mal les différences de propriétés des cristaux suivant les différentes directions et peut-être faut-il, comme l'ont fait Wiedemann et d'autres physiciens, avoir aussi recours à l'hypothèse de forces moléculaires mécaniques ajoutant leurs effets aux forces magnétiques.

Quoi qu'il en soit, il reste d'ailleurs à dire comment et pourquoi les molécules sont elles-mêmes des aimants. On sait que, d'après Ampère, chaque molécule serait parcourue par un courant fermé, équivalant, par suite à un petit aimant ; cette théo-

rie complétée par Weber, reprise par Ewing, représente assez bien les faits ; on conçoit bien que les courants s'orientent sous l'action du champ, on conçoit aussi, qu'au moment de la réaction du champ, il se produise des courants induits obéissant à la loi de Lenz et ayant, par conséquent, un sens contraire à celui des courants primitifs ; ces courants permettent d'interpréter les phénomènes du diamagnétisme.

Mais, quand on entre dans le détail, on rencontre des difficultés que Maxwell a en vain cherché à écarter ; aussi bien, de nouvelles questions se posent, auxquelles on ne peut donner de réponses : d'où viennent ces courants particulaires eux-mêmes ? quelle est l'origine de la quantité d'énergie qui, si faible soit-elle, doit être mise en jeu ?

M. Langevin a cherché à rattacher les phénomènes du magnétisme aux idées, actuellement si en faveur, d'après lesquelles la matière serait une agglomération de centres électrisés, d'électrons en mouvement ; il a pu ainsi, grâce à une analyse très pénétrante, proposer une théorie d'ensemble qui paraît rendre compte de la plupart des faits et qui, en tout cas, est une construction des plus ingénieuses et des plus puissantes. Cette théorie est, en quelque sorte, pour le magnétisme, l'équivalent de ce qu'est, dans l'étude des propriétés des gaz, la théorie cinétique ; elle établit, d'ailleurs, un lien étroit entre l'aimantation et les propriétés thermiques et elle a permis à M. Langevin de retrouver, par le calcul, les lois de Curie, relatives à l'invariabilité de la constante diamagnétique quand la température change

et à la variation inversement proportionnelle à la température absolue de la suceptibilité paramagnétique. Elle justifie d'ailleurs l'idée, qu'avait présentée le génie de Curie, d'assimiler la continuité qui existe entre le paramagnétisme et le ferromagnétisme à celle qui est établie entre les états gazeux et liquide. Dans un cas comme dans l'autre, les actions mutuelles des particules jouent un rôle fort analogue.

Dans un travail tout récent et fort remarquable, M. P. Weiss a montré comment l'on peut fonder une théorie du ferromagnétisme sur une hypothèse extrêmement simple concernant ces actions mutuelles ; il parvient ainsi à interpréter, d'une manière très satisfaisante, les propriétés qu'il avait antérieurement découvertes dans la pyrrhotine, en particulier la curieuse conception de l'intensité d'aimantation à saturation obtenue dans un champ extérieur nul.

En face de ces théories, reposant sur des hypothèses moléculaires, les savants qui pensent pouvoir édifier des théories physiques fondées uniquement sur les principes généraux auxquels conduisent, par induction, les faits expérimentalement établis, ont construit des théories synthétiques, également remarquables. Ainsi, M. Duhem est parvenu à établir, en s'appuyant sur les principes de la thermodynamique, joints, il est vrai, à quelques hypothèses un ensemble très cohérent où, particulièrement, le phénomènes d'hystérèse, se trouvent reliés à tou un ensemble de faits analogues et, de cette manière,

se trouvent groupés ces phénomènes de retard qui se rencontrent dans beaucoup de propriétés de la matière. La théorie de M. Duhem, en dehors de son intérêt philosophique, conduit à des résultats qui concordent très bien avec les expériences relatives à des cas très complexes, en particulier, avec les résultats obtenus par M. Maurain sur l'hystérésis magnétique produite par un champ oscillant, superposé à un champ tournant ou à un champ constant.

CHAPITRE III

L'induction et le courant électrique.

---

§ 1. — L'INDUCTION CONSIDÉRÉE COMME LE PHÉNOMÈNE ÉLECTRIQUE FONDAMENTAL

L'industrie électrique contemporaine est née de la découverte des phénomènes d'induction; jusqu'au moment où ces phénomènes vinrent mettre à la disposition des physiciens un moyen avantageux et commode de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique, les applications des courants ne pouvaient guère sortir que très timidement du domaine des laboratoires.

Les piles fournissaient bien l'électricité dans des conditions fort remarquables, mais l'énergie chimique dépensée était trop chère, et, trop encombrants, trop peu maniables étaient les appareils générateurs. L'antique mode de production de l'électricité au moyen des phénomènes de frottement et d'influence avait bien un intérêt théorique que les idées récentes ne font que rendre plus grand encore, mais ici le rendement était déplorable, la

majeure partie du travail dépensé se dissipait par les frottements, en se transformant en chaleur, et d'ailleurs l'énergie électrique apparaissait sous une forme difficile à utiliser; pareille à un mince filet d'eau tombant d'une hauteur prodigieuse, la quantité d'électricité produite était trop petite et le potentiel d'où elle pouvait tomber était trop élevé.

Les lois de l'induction sont des plus simples à énoncer, la base scientifique sur laquelle reposent ainsi tant d'applications, dont les conséquences ont une immense portée, est d'une puissante solidité; mais elle est fort peu étendue et il est aisé de voir comment elle est établie.

Si l'on considère un circuit, de forme quelconque, constitué par un fil conducteur placé dans un champ magnétique, il se produira dans ce circuit, quand, par n'importe quel procédé, on modifiera le flux de force magnétique qui le traverse, un courant électrique dont la durée est égale à celle de la variation du flux; on peut dire que le courant est dû à la création dans le fil d'une force électromotrice, la force électromotrice d'induction, qui dépend d'une façon très simple de la variation, par rapport au temps, du flux total d'induction magnétique qui traverse le circuit: si, par exemple, le flux varie proportionnellement au temps, la force électromotrice est égale et de signe contraire à la variation du flux pendant l'unité de temps.

En ces quelques mots, nous avons dit tout ce qu'il est théoriquement nécessaire de savoir pour comprendre le principe des générateurs électriques modernes, mais l'énoncé précédent suppose, bien

entendu, la connaissance préalablement acquise du courant électrique et des lois essentielles qui régissent sa propagation.

Historiquement les choses se sont bien d'ailleurs présentées ainsi : lors de la découverte faite par Faraday, en 1831, les physiciens étaient habitués, depuis plus d'un quart de siècle, à considérer le courant produit par les piles, ils utilisaient déjà quelques-uns de ses effets, et, une dizaine d'années auparavant, l'expérience d'Oersted avait provoqué les immortels travaux d'Ampère et d'Arago.

Aussi, la tradition s'est-elle conservée et l'on fait, presque toujours, malgré l'importance prédominante qu'ils ont acquise, jouer aux phénomènes d'induction un rôle en quelque sorte secondaire par le rang que leur assignent dans l'exposition la plupart des traités didactiques d'électricité. Le procédé a peut-être quelque avantage pédagogique; l'on peut même prétendre que le hasard seul n'a pas présidé à l'ordre chronologique dans lequel se sont effectuées les découvertes et que, sans l'invention préalable du galvanomètre qui permet de déceler des courants de faible intensité, il eut été bien difficile à un Faraday lui-même de réaliser ses expériences.

Il n'en est pas moins vrai que la pile est un organe extrêmement complexe dont la connaissance n'est pas logiquement nécessaire pour comprendre la plupart des lois du courant et qu'il est loisible d'imaginer que les phénomènes d'induction aient été étudiés avant les phénomènes électrochimiques et les phénomènes électromagnétiques. S'il en avait

été ainsi, les questions qui se posent au physicien ne se seraient évidemment pas présentées dans l'ordre où d'ordinaire on les examine et, peut-être, y a-t-il quelque intérêt, particulièrement lorsque l'on désire, avant tout, se pénétrer des principes sur lesquels s'appuie l'industrie actuelle, à envisager les choses du côté qui nous paraît aujourd'hui le plus rationnel en dehors de toute considération historique.

Supposons donc un expérimentateur d'une grande adresse, et doué d'une perspicacité des plus heureuses, imaginons qu'il ignore tout de l'électricité, mais qu'il possède des aimants et qu'il a acquis l'idée du champ magnétique ; donnons-lui aussi, si l'on veut, une instruction mécanique avancée et la notion de l'énergie telle que nous la concevons aujourd'hui.

L'expérience initiale, bien difficile en vérité à cause de la petitesse des effets observés, mais théoriquement possible, qui pourrait le mettre, cet habile expérimentateur, sur le chemin où il rencontrerait tant de faits nouveaux, consisterait à déplacer très rapidement un aimant puissant dans le voisinage d'un fil métallique formant un circuit fermé et à constater, par quelque moyen délicat, que ce fil s'échauffe.

Étudiant alors de plus près ce phénomène, il parviendrait à préciser les conditions dans lesquelles se produit cet échauffement. Il découvrirait que la chaleur dégagée dépend du mouvement relatif de l'aimant par rapport au circuit et l'on peut supposer qu'il serait amené, pour avoir des mani-

festations calorifiques plus intenses, à enrouler le fil sur une bobine, de manière à multiplier le flux par le nombre des spires, et même, puisqu'il connaîtrait bien les phénomènes de l'aimantation, il songerait sans doute à introduire un noyau de fer dans la bobine, de façon à accroître, grâce à la perméabilité du fer, la variation du flux.

Désormais en possession d'un moyen d'obtenir des effets très sensibles, il pourrait procéder à de véritables mesures et, s'il parlait le langage auquel nous sommes aujourd'hui habitués, il exprimerait les résultats obtenus en disant que, pour un fil donné, la chaleur produite pendant un certain temps est proportionnelle au carré de la différence entre le flux magnétique qui traversait le circuit au début et celui qui le traverse à la fin.

Mais sa curiosité ne saurait se contenter ainsi; il voudrait aller plus loin et il chercherait à pénétrer plus avant dans le mécanisme du dégagement de chaleur dont le fil est le siège; il serait, de proche en proche, conduit à découvrir les diverses propriétés du courant électrique.

S'il connaissait auparavant les expériences déjà anciennes, relatives à l'électrostatique, s'il avait, par exemple, sur ce sujet le savoir que possédaient les physiciens avant les découvertes de Volta, il ne manquerait certainement pas de remarquer qu'il existe une grande analogie entre la décharge d'un condensateur et les phénomènes qui se produisent dans la bobine; peut-être le fil qui, tout d'abord, formait un circuit fermé serait-il, quelque jour, rompu en un point par un heureux hasard, et l'étin-

celle jaillissant entre les deux extrémités, ou bien une secousse déjà assez sensible, lui révélerait la nature électrique de ses propres expériences.

Il n'y a d'ailleurs aucune absurdité logique à admettre qu'au lieu d'avoir, comme point de départ, l'observation des attractions produites par un diélectrique frotté contre un autre isolant, l'électrostatique elle-même aurait pu dériver de la découverte de l'induction : entre les deux extrémités d'un fil formant boucle, lorsque la spire est soumise à une variation de flux magnétique, il se manifeste ce que nous appelons aujourd'hui une différence de potentiel. Cette différence peut être utilisée pour charger un condensateur, et un condensateur chargé représente le phénomène électrostatique essentiel dont l'étude a, en somme, été l'origine de toutes les découvertes faites jusqu'à ce jour dans cette partie de la Science.

Quoi qu'il en soit, un fait attirerait l'attention de notre génial expérimentateur imbu de nos idées modernes et lui paraîtrait d'autant plus étrange qu'il aurait une idée plus nette du principe de la conservation de l'énergie : il remarquerait qu'en effectuant son expérience initiale il a créé de l'énergie dans le fil, et cependant, de prime abord, il n'apercevrait nulle part une destruction d'énergie équivalente.

Il se trouverait ainsi, vis-à-vis de sa découverte, s la posture où nous avons vu de nos jours les siciens en face des phénomènes de radioactivité, demanderait s'il est parvenu à mettre le prin- de la conservation de l'énergie en échec ou si,

au contraire, il ne lui reste pas à faire une nouvelle découverte complémentaire de la première.

Ici encore, la réponse lui serait fournie par des expériences délicates de mesure; si l'on déplace un circuit métallique fermé dans un champ magnétique, il faut dépenser du travail, tout se passe comme si ce champ était une sorte de milieu visqueux; il y a, en quelque manière, un frottement à vaincre et c'est l'équivalent de l'énergie mécanique absorbée dans ce frottement qui se retrouve dans le fil, sous forme d'énergie électrique, se transformant elle-même spontanément en chaleur.

Mais d'où viennent ces forces qu'exerce sur le circuit le champ magnétique?

Puisqu'un tel champ ne peut avoir d'effet que sur des aimants, ne doit-on, par suite, penser que le fil où se produit ce phénomène particulier, que l'on appelle le courant électrique, est devenu lui-même équivalent à un aimant, et, par suite encore, admettre qu'un courant crée autour de lui un champ magnétique?

L'expérience permettrait de justifier ces prévisions et, dans un enchaînement logique, se déroulerait ainsi une longue série de découvertes capitales.

On pourrait pousser les choses plus loin et ne pas se contenter d'une connaissance simplement qualitative des faits; par des calculs faciles, que nous ne voulons point développer ici, on tirerait de la loi fondamentale de l'induction, telle qu'elle a ét supposée déduite de l'expérience, et de l'applicatio du principe de la conservation de l'énergie, l valeur du champ créé en un point par un circui

de forme connue, parcouru par un courant donné, ou, si l'on préférait, on parviendrait aisément à donner une démonstration de la loi élémentaire de Laplace qui fait connaître quelle devrait être l'action d'un élément de courant sur un pôle pour que, si l'on fait la sommation de ces actions élémentaires, on trouve l'action réelle exercée par tout un circuit fermé.

En d'autres termes, il serait aisé, en partant de la connaissance des phénomènes d'induction, de reconstruire ces beaux chapitres de la physique que l'on appelle l'électromagnétisme et l'électrodynamique et qu'ont, sur un autre plan, édifiés les génies de Laplace et d'Ampère.

§ 2. — LES THÉORIES DE L'INDUCTION

Dans la réalité, le progrès de la science électrique s'est développé suivant un ordre inverse, et l'on savait qu'un courant agit sur des aimants et comment s'exerce exactement cette action, lorsque Faraday fit ses célèbres expériences. Mais, par contre, on ignorait encore le principe de la conservation de l'énergie et cette ignorance empêcha tout d'abord d'apercevoir nettement la véritable corrélation entre les phénomènes de l'électromagnétisme et ceux de l'induction.

Quelques années avant Faraday, Ampère avait onstaté qu'au moment où on lançait un courant ans une spirale, un anneau de cuivre voisin, placé n face d'un aimant, se trouvait repoussé ou attiré ar cet aimant, suivant la direction du courant

excitateur, et suivant la position relative des pôles; il avait été conduit à cette expérience par la pensée qu'un courant pourrait exercer sur des conducteurs placés à distance une sorte d'action analogue aux effets d'influence étudiés dans l'électrostatique; mais Ampère et de La Rive, qui s'était associé à lui dans cette recherche, avaient cette idée préconçue que le phénomène serait un effet permanent, idée qui est, nous le comprenons aujourd'hui, en contradiction évidente avec le principe de la conservation de l'énergie; ayant observé un phénomène instantané, contraire à leur prévision, ils crurent se trouver en présence d'un fait accidentel ne méritant pas une étude ultérieure; tant il est vrai que les esprits les plus profonds n'échappent pas à la règle commune et ne savent pas toujours se libérer des opinions faites d'avance et s'incliner devant l'expérience d'où découle cependant toute vérité. Ainsi Ampère laissa à Faraday la gloire d'une découverte qui égale en importance celles qu'antérieurement il avait faites lui-même.

C'est à Faraday que nous devons, non seulement la connaissance des courants induits, mais encore la façon de les envisager actuellement admise; il les attribuait, très nettement, à un phénomène se produisant dans le champ magnétique, et il considérait les lignes de force comme symbolisant une altération du milieu qu'elles sillonnent. Lorsque les lignes qui traversent un circuit viennent à changer, la nouvelle altération du milieu se traduit par un courant.

Mais les physiciens de son temps comprirent mal

ses idées; et pendant de longues années des savants distingués consacrèrent d'ingénieux efforts à résoudre des questions qui nous semblent aujourd'hui assez vaines.

Il n'était cependant pas, dans les débuts, inutile de démontrer que les courants induits étaient de même nature que les courants produits par la pile. Obtenus d'abord dans des conditions telles que leur durée était très courte, avec des bobines où la self-induction mal comprise jouait un rôle considérable, ils se présentaient avec des caractères assez singuliers.

D'autre part, au moment même où l'on venait de de découvrir ces courants, les recherches de Melloni avaient établi que, dans la chaleur, jusque-là considérée comme simple, il existait des radiations complexes, et, par analogie, par un de ces abus de comparaison contre lesquels on ne se met jamais suffisamment en garde, on était porté à croire que le courant électrique, lui aussi, devait posséder des aspects très différents et des propriétés très variées suivant ses origines.

L'idée la plus simple n'est pas toujours celle qui s'impose la première; mais ici, comme sur d'autres terrains, elle finit par triompher.

Une méthode semblable à celle qui avait si bien réussi à Ampère, et qu'il avait lui-même hérité de Newton, fut celle qu'adoptèrent les premiers mathématiciens qui tentèrent d'édifier une théorie de l'induction ; cette méthode consiste à ne pas se préoccuper de la cause physique du phénomène, mais à

déduire, de quelques lois expérimentales précises, une formule qui permet, étant donnés deux éléments infiniment petits, placés d'une manière quelconque, de trouver l'intensité du courant produit dans l'un d'eux, lorsque l'autre s'éloigne ou se rapproche, ou bien lorsqu'il est traversé par un courant dont l'intensité varie. La formule élémentaire ainsi trouvée n'a, pour ainsi dire, qu'une valeur mathématique : elle ne correspond à aucune réalité, puisqu'il est impossible de faire agir l'un sur l'autre deux courants non fermés et puisqu'il n'existe même pas, si on adopte les vues de Maxwell, de courants ouverts. Mais si l'on est en possession de cette formule, toutes les questions que l'on peut se poser relativement à l'induction dans des circuits fermés réels, de forme géométrique connue, se ramèneront à des intégralions plus ou moins simples ; le rôle du mathématicien restera parfois difficile, mais celui du physicien sera terminé.

Neumann et Weber ont construit des théories qui furent célèbres et qui restent intéressantes ; le point de départ de la théorie exposée par Neumann était ce principe, admis comme un fait expérimental, que, dans le déplacement relatif de deux systèmes, le courant induit, pendant un temps très court, est proportionnel à la vitesse du mouvement, et l'illustre savant arrivait ainsi à montrer qu'il existe une relation simple entre la force électromotrice produite et le travail dépensé dans le déplacement pour vaincre les actions électromagnétiques qui s'exercent entre les deux circuits.

La liaison, ainsi établie entre l'induction et l'élec-

tromagnétisme, était fort intéressante, mais elle ne devait prendre sa véritable signification qu'à la lumière du principe de la conservation de l'énergie.

On sait qu'indépendamment l'un de l'autre, et presque à la même époque, Helmholtz d'abord, puis Lord Kelvin, sont arrivés à la même conclusion: l'application du principe de la conservation de l'énergie permet de calculer la force électromotrice d'induction correspondant à une variation connue du flux qui traverse un circuit. Dans son célèbre mémoire sur la « Conservation de la force », Helmholtz donnait pour la première fois aux idées énoncées cinq ans auparavant par Robert Mayer une forme précise, et l'on peut dire que cette application du principe de la conservation de l'énergie aux phénomènes de l'induction fut la première consécration de la valeur du principe lui-même et, pour ainsi dire, son véritable début dans la science où il était appelé à jouer rapidement le premier rôle.

On a cru longtemps, et l'on répète encore souvent, même dans d'excellents traités d'électricité, que l'existence des phénomènes d'induction peut être considérée comme une conséquence nécessaire du principe de la conservation de l'énergie, combiné avec les lois des actions électromagnétiques. Ainsi énoncée, la proposition est inexacte; c'est vouloir singulièrement forcer le sens du principe que de lui faire commander la nature d'une si stricte façon. Quand une quantité d'énergie apparaît quelque part dans un système fermé, une quantité équivalente doit disparaître ailleurs; mais rien

n'impose à ce second phénomène, corrélatif du premier, un siège particulier ou une forme déterminée.

Un aimant attire un courant, il y a donc du travail mécanique produit ; mais d'où provient-il, ce travail? Le principe ne nous apprend rien à cet égard ; il pourrait y avoir refroidissement du fil dans lequel circule le courant, modification dans le milieu qui sépare le circuit et l'aimant, altérations diverses dans cet aimant lui-même. Il y a plus : alors même que nous n'arriverions à rien découvrir en aucun endroit, il nous resterait toujours, pour ne pas avouer notre embarras, la ressource de nous payer de mots et de dire que le travail recueilli provient d'une diminution de l'énergie potentielle du système. Aussi bien, est-ce de cette façon que l'on traduit — je ne dis pas que l'on explique — la manière dont agissent l'un sur l'autre deux aimants permanents.

Mais, lorsque l'on voit un courant qui se déplace sous l'action des forces électromagnétiques et que l'on constate que l'on peut ainsi obtenir des rotations continues, il paraît bien peu vraisemblable que le travail recueilli puisse provenir, dans ce cas, d'une perte compensatrice dans l'énergie potentielle du système. Il faudrait, en effet, supposer que cette énergie a, pour ainsi dire, une valeur infinie ; et cette supposition répugne presque au bon sens. Nous sommes ainsi amenés, assez naturellement, à admettre l'hypothèse contraire : l'énergie potentielle demeure invariable, et le travail mécanique que nous recueillons a son équivalent dans une dimi-

nution de l'énergie électrique propre au courant, ou, si l'on préfère, dans les effets d'une force électromotrice qui se produit le long du circuit sur lequel agissent les forces électromagnétiques.

Dès lors, rien n'est plus facile que de déterminer cette force électromotrice, et le principe de la conservation de l'énergie intervient légitimement pour nous permettre de la calculer. Il nous fournit alors la valeur que nous avons déjà donnée pour la force électromotrice totale induite dans un circuit fermé traversé par un flux variable, et l'on admettra que cette force électromotrice est la même, quelle que soit l'intensité du courant qui circule au préalable dans le fil, fût-elle même nulle tout d'abord.

Au lieu d'envisager le circuit tout entier, on peut considérer un élément du fil conducteur se déplaçant dans un champ magnétique ; on démontrerait aisément que la force électromotrice dans cet élément a pour mesure le volume du parallélipipède ayant pour arêtes trois vecteurs représentant, le premier, l'intensité du champ conducteur, le second, la longueur du fil induit, le troisième, la vitesse de déplacement de ce fil.

Sous cette forme, la loi est facilement applicable aux cas que l'on rencontre le plus fréquemment dans la pratique.

Pour achever de déterminer cette force électromotrice, il faut, bien entendu, donner le sens dans quel elle agit ; ce sens est toujours tel que cette rce électromotrice tend à s'opposer à la cause, ielle qu'elle soit, qui lui donne naissance. Il ne urait en être autrement, d'après le principe de la

conservation de l'énergie; mais la remarque est antérieure au principe : elle a été faite, on le sait, dès 1833, par un physicien russe, Lenz, qui énonçait ainsi, dans un cas particulièrement intéressant, un fait très général : partout et toujours, il y a opposition de la réaction à l'action.

La connaissance de la loi fondamentale de l'induction, loi déduite ainsi d'un principe universel, suffit pour aborder tous les problèmes qui se posent aujourd'hui à l'ingénieur, mais elle ne contente pas l'esprit de ceux qui veulent se faire des représentations concrètes des phénomènes.

C'est encore à Faraday que l'on doit l'idée essentielle qui domine toutes les hypothèses imaginées par les physiciens modernes; il pensa, le premier, que la source des manifestations électriques est moins dans les conducteurs que dans le milieu diélectrique qui les sépare. Plus tard, lorsque la notion d'énergie fut bien comprise, Maxwell, précisant les idées de Faraday, fit voir qu'en chaque point du champ magnétique, il y a de l'énergie localisée sous une forme que nous ignorons, mais telle que le déplacement d'un fil conducteur placé en ce point ne peut se faire sans dépense de travail mécanique, par suite des réactions que le milieu, déformé sous l'influence magnétique, exerce sur ce fil. Plus récemment, un savant mathématicien anglais, M. Poynting, a édifié une théorie complète o il montre, d'une façon rigoureuse, comment milieu qui entoure un conducteur parcouru par courant électrique peut être considéré comme

N° 61. — 22e ANNÉE. LE NUMÉRO : 15 CENTIMES 16 DÉCEMBRE 1906.

Le Bon Journal

MAGAZINE ILLUSTRÉ

PARIS, DÉPARTEMENTS, ALGÉRIE et TUNISIE : Six mois . 4 fr. 50. — Un an : 8 fr.
ÉTRANGER, UNION POSTALE . . . . Six mois : 7 fr. — Un an : 13 fr.

On peut S'ABONNER SANS FRAIS dans tous les bureaux de poste

Le BON JOURNAL *ne répond pas des manuscrits*

ADMINISTRATION & RÉDACTION
Rue Racine, 26, Paris (6e arr.)

Directeur : Ernest FLAMMARION, Éditeur

Le BON JOURNAL paraît le Dimanche

LE PILOTE N° 10, PAR LÉON BERTHAUT



LES BRAS CROISÉS, IL MURMURA : « MOI, JE L'ADORE ! » (*Page* 770.)

siège principal des actions, le conducteur rendant seulement manifeste leur dernière phase.

On sait quels fruits précieux a produit, de nos jours, la conception de Faraday ; elle amena Hertz à ses géniales expériences sur la propagation des phénomènes d'induction et à la découverte des oscillations électriques.

Je n'insisterai pas sur ce sujet, que j'ai traité ailleurs, et je me permettrai aussi de renvoyer à mon livre : « *la Physique moderne* » le lecteur qui désirerait savoir comment, dans les théories modernes, dans la théorie de Lorentz par exemple, les phénomènes d'induction apparaissent comme la conséquence des variations de vitesse des électrons.

§ 3. — LE CIRCUIT MAGNÉTIQUE.

Quelle que soit la théorie adoptée, la réciprocité parfaite entre les actions électriques et magnétiques est expérimentalement établie ; le champ électrique et le champ magnétique sont étroitement solidaires l'un de l'autre, la variation de l'un donne immédiatement et obligatoirement naissance à l'autre.

Un courant électrique crée donc autour de lui un champ magnétique, il est, par là, assimilable à un aimant et l'on sait qu'Ampère a montré que cet aimant équivalent serait un feuillet magnétique limité au contour dn courant, ayant une puissance umériquement égale à l'intensité de ce courant, et :l que sa face nord soit tournée à gauche du couant.

L'assimilation se poursuit également dans les

actions mécaniques que subit un courant dans un champ magnétique; là encore, le courant se comporte comme le feuillet équivalent et ses actions se peuvent calculer en lui attribuant l'énergie potentielle qu'aurait ce feuillet; il importe cependant de bien remarquer, comme il a été expliqué plus haut, que cette énergie n'est pas l'énergie que possède réellement à l'état potentiel le courant.

Au lieu de déduire ainsi l'action électromagnétique des variations de l'énergie potentielle, on peut, d'une façon analogue à celle dont on a procédé pour le calcul de la force électromotrice d'induction, s'adresser à une loi élémentaire faisant connaître l'action exercée sur un élément de conducteur placé dans un champ magnétique donné et parcouru par un courant d'intensité connue; cette force est perpendiculaire au plan qui contient le champ et l'élément et elle a même mesure que le volume du parallélipipède droit ayant comme base le parallélogramme construit sur le champ et l'élément, pour hauteur, une longueur égale à l'intensité du courant.

Cette formule, particulièrement commode pour les applications, est une conséquence facile à démontrer de la loi générale fondée sur la considération de l'énergie, elle est aussi, en quelque sorte, la réciproque de la formule de Laplace qui donne l'expression du champ produit en un point donné par un élément de courant déterminé. On peut, en effet, pour connaître le champ créé par un courant, procéder d'une façon analytique, et, au lieu d'envisager l'action du courant tout entier assimilé à un feuillet,

considérer cette action comme la résultante d'actions élémentaires exercées par chacun des éléments du courant ; il importe de remarquer, encore une fois, que cette façon de procéder n'a, dans les idées actuelles, qu'une valeur purement mathématique : on ne peut, pour évaluer un champ, faire agir un élément de courant sur un pôle, puisque le courant est toujours fermé, mais il est possible de trouver une formule élémentaire qui donne, lorsqu'on fait la sommation pour un courant réel, une expression conforme à l'expérience ; cette formule c'est la formule de Laplace que le célèbre savant fit, on le sait, connaître dans la séance même où Biot et Savart communiquaient à l'Académie le résultat de leurs mesures sur les actions exercées par un courant rectiligne et par un courant anguleux sur un pôle d'aimant.

Que l'on utilise un procédé de calcul ou un autre, l'on pourra aisément évaluer le champ dans le cas le plus important pour les applications, le cas d'un solénoïde ou ce qui revient pratiquement au même d'une bobine. A l'intérieur d'une bobine enroulée sur un cylindre indéfini, le champ est parallèle à l'axe du cylindre et a une valeur proportionnelle à l'intensité du courant qui parcourt la bobine et proportionnelle aussi au nombre de spires par unité de longueur. Si les spires sont régulièrement enroulées le long d'un anneau circulaire, les lignes de forces ıt circulaires et, pourvu que le rayon de la section ıite de cet anneau, de ce tore, soit petit par rap-·t à son rayon de révolution, le champ sera cons-t en tous les points de l'anneau et aura la même

valeur que dans un cylindre indéfini : Supposons que l'on introduise du fer dans cet anneau, le champ augmentera à cause de la perméabilité plus grande du fer.

Au lieu d'envisager le champ, on peut considérer, comme nous avons fait antérieurement, le flux magnétique produit dans le noyau et dont l'expression s'obtiendra en multipliant la valeur de l'induction par la section du noyau ; il résulte de ces considérations que le flux dépend ainsi d'un certain nombre d'éléments, mais on peut grouper ces éléments en deux ensembles ; le premier représentant, en quelque sorte, la cause productrice du flux, le second renfermant les caractéristiques du milieu où ce flux se produit. Le premier a reçu le nom de force magnétomotrice de la bobine ; le second, celui de résistance magnétique ou encore réluctance du circuit et l'on est ainsi conduit à énoncer la loi suivante : Le flux à travers le noyau d'un solénoïde fermé est égal au quotient de la force magnétomotrice du solénoïde par la résistance magnétique du noyau.

La force magnétomotrice a pour valeur exactement (dans le système C. G. S.) le produit par $\frac{4\pi}{10}$ du nombre d'ampères-tours de la bobine (c'est-à-dire du produit du nombre de spires par l'intensité du courant qui les parcourt évaluée en ampères) ; la réluctance est le quotient de la longueur moyenne du tore par le produit de la section et de la perméabilité du noyau.

Sous cette forme une analogie très frappante apparait : le circuit magnétique peut être considéré comme conduisant le flux magnétique d'une manière

semblable à celle dont le circuit électrique, conformément à la loi d'Ohm, conduit le flux électrique ; la force magnétomotrice est l'analogue de la force électromotrice du générateur qui entretiendrait le courant électrique ; la réluctance est l'analogue de la résistance électrique, ces deux grandeurs sont l'une et l'autre proportionnelles à la longueur et en raison inverse de la section du circuit donné et leur valeur dépend d'un coefficient qui caractérise la plus ou moins grande facilité avec laquelle le milieu considéré se laisse traverser par un flux ; flux d'électricité s'il s'agit d'un milieu conducteur soumis à l'action d'une force électromotrice ; flux d'induction si l'on envisage un milieu magnétique soumis à une force magnétomotrice.

Il convient toutefois de ne pas perdre de vue qu'une analogie n'est pas une identité ; une ressemblance, même assez étroite, entre des formules n'implique nullement une parité véritable, entre les phénomènes.

Le flux magnétique et le flux électrique ne sauraient à un point de vue très important, se comparer : le courant électrique doit, à chaque instant, faire un emprunt à la source d'énergie qui l'entretient, parce que, à chaque instant aussi, il dissipe de l'énergie sous forme de chaleur, conformément à la loi de Joule ; la force magnétomotrice maintient au contraire le flux magnétique sans que ce flux donne naissance à un dégagement de chaleur, le courant qui circule dans les spires de la bobine est bien nécessaire pour entretenir le flux magnétique, mais, pour cet entretien, il n'est pas nécessaire de dépenser, aucune fraction de l'énergie du courant.

Une autre différence, moins importante peut-être pour qui n'envisagerait que les principes, mais fort digne d'attention quand on considère la pratique, provient de ce que l'on ne peut légitimement comparer la conductibilité à la perméabilité ; tandis, en effet, que le coefficient de conductibilité est une véritable constante, au moins lorsque la température est invariable, le coefficient de perméabilité dépend au contraire de l'état magnétique du métal, et il en dépend même d'une manière assez compliquée.

Nous avons vu que, partant d'abord d'une valeur finie pour une induction faible, il commençait par croître lorsque l'induction augmentait, puis qu'il passait par un maximum pour une certaine valeur de l'induction ; enfin qu'il décroissait et tendait vers l'unité, lorsque l'induction augmentait indéfiniment.

La reluctance n'est donc pas, dans la réalité, indépendante du flux magnétique, comme la résistance électrique est indépendante de l'intensité ; et cette variabilité vient sigulièrement compliquer les problèmes relatifs au circuit magnétique.

Malgré ces réserves, l'on peut se laisser guider par les analogies que présentent les deux circuits et résoudre ainsi des questions qui auraient paru, sans ce fil conducteur, bien difficiles à élucider.

Cette façon de procéder n'a pas laissé, au début, de paraître quelque peu téméraire aux physiciens qui ne veulent avancer qu'après avoir vérifié la parfaite solidité du terrain où ils s'engagent. Ils ont ici été précédés et entraînés par les praticiens, ce sont des ingénieurs et non des théoriciens qui ont eu l'idée première de l'assimilation entre le circuit ma-

gnétique et le courant électrique et l'on doit avouer que la hardiesse de ceux-là n'avait pas tout d'abord eu l'entière approbation de ceux-ci.

Aussi bien, jusqu'à l'invention de l'anneau de Gramme, la considération d'un circuit magnétique fermé ne pouvait que paraître sans intérêt. A quoi bon envisager un aimant qui ne possède plus de pôle et qui n'émet au dehors aucune ligne de force, si l'on a seulement en vue des phénomènes extérieurs, des attractions par exemple, ou même la production de courants induits par des déplacements dans le champ qu'entoure cet aimant? A cet égard, le circuit fermé est inerte, il n'attire plus la limaille, il ne modifie en rien l'espace qui l'environne, mais malgré cette absence d'action extérieure, il n'est pas un morceau de fer quelconque, si l'on brise les lignes d'induction en brisant le fer, des pôles apparaitront aux extrémités, et, dans l'*entrefer* ainsi produit, le spectre magnétique révélera l'existence du flux qui, tout à l'heure, existait confiné dans l'anneau magnétique.

En réalité, c'est précisément lorsque le circuit est ainsi ouvert, qu'il y a avantage à poursuivre la comparaison avec le courant électrique fermé ; l'on considérera que le flux se ferme à travers l'air et l'on étendra, à ce cas, la formule démontrée seulement, en toute rigueur, pour le cas d'une bobine indéfiniment allongée ou dont on aurait affronté les deux bouts.

Alors même que le fil ne serait plus régulièrement nroulé, alors même qu'il y aurait une coupure, nous appliquerons la formule généralisée par analogie avec la loi d'Ohm et avec les corollaires qu'en a

tiré Kirchhoff relativement aux circuits dérivés.

C'est ainsi que nous arriverons à établir que chaque portion d'un circuit magnétique exige un certain nombre d'ampères-tours pour l'entretien du flux correspondant et que le nombre total d'ampères-tours est la somme de ces ampères-tours partiels et nous pourrons, par là, nous rendre compte de la manière dont la dépense, due à la chaleur dégagée dans la bobine magnétisante, se répartit dans les différentes portions du circuit magnétique ; en particulier, nous comprendrons comment un entrefer, même très faible, absorbe une force magnétomotrice considérable. C'est ainsi encore que nous pourrons aborder les importants problèmes qui se posent dans le cas des circuits magnétiques dérivés.

C'est, vers 1886, que ces idées relatives au circuit magnétique ont commencé à se préciser et à former un ensemble cohérent ; deux savants anglais, MM. J. et L. Hopkinson peuvent, avec raison, réclamer l'honneur de les avoir, les premiers, appliquées ; elles leur ont permis de constituer une véritable théorie des dynamos. Antérieurement, il fallait s'adresser à des formules empiriques, à de longues études expérimentales, pour établir un projet de construction et des mécomptes se produisaient bien souvent ; aujourd'hui, on suit une marche absolument logique dans le calcul et l'on peut savoir d'avance quelle sera la force électromotrice et le débit, dans un service courant, d'une machine dont le plan est rationnellement dressé.

La considération du circuit magnétique a permis également de mieux comprendre les conditions où

il convient de se placer si l'on veut avoir un champ magnétique très intense. On peut ainsi, comme l'ont fait très habilement M. P. Weiss ou M. du Bois, obtenir des électro-aimants très puissants qui donnent, dans des espaces de l'ordre du centimètre, des champs 200,000 fois plus grands que la composante horizontale du champ terrestre.

§ 4. — LE COURANT ALTERNATIF

Aussi longtemps que l'on n'eut, comme générateurs, que les piles hydroélectriques ou les piles thermoélectriques, la seule forme connue de courant fut le courant continu; il eût paru pour le moins inutile de compliquer les choses et d'utiliser quelque procédé mécanique capable d'intervertir le sens du courant fourni par une pile, pour obtenir finalement un courant impropre à l'électrolyse, incapable d'actionner un électro-aimant, sans effet sur un galvanomètre ordinaire.

La découverte des phénomènes d'induction changea les conditions dans lesquelles se présentait naturellement l'énergie électrique; ces phénomènes nous mettent, en effet, en face des courants alternatifs.

Si l'on déplace un circuit dans un champ, disons pour simplifier dans un champ uniforme, on pourra obtenir un courant en faisant varier le flux qui le traverse; le plan du circuit sera, par exemple, tout d'abord perpendiculaire aux lignes de force et on le fera tourner d'un angle droit de manière à le rendre parallèle à ces lignes; le flux qui entrait, je

suppose, par la face droite était maximum, il est devenu nul; un courant s'est produit, mais il a peu duré.

Veut-on continuer l'expérience, il faudra nécessairement continuer la rotation du circuit; le flux va alors entrer par l'autre face, la face gauche; ce flux devient négatif, sa valeur absolue augmente, puis passe par un maximum; continuons encore à faire tourner le circuit pour le ramener à sa position initiale, le flux va maintenant décroître, s'annuler à nouveau, puis changer de signe et croître de nouveau en valeur absolue. Le courant produit aura, par suite, changé de sens pendant la durée de la rotation, on aura obtenu un courant alternatif.

Cette forme de courant parut tout d'abord une singularité, propre à exercer des actions physiologiques assez intenses, mais d'un médiocre intérêt au point de vue théorique et peu convenable pour les applications pratiques, les premiers efforts des physiciens et des constructeurs furent consacrés, à la suite des découvertes de Faraday, à la recherche d'artifices capables de redresser les courants induits et de les rendre pratiquement constants; et l'industrie électrique ne prit son essor que le jour où Gramme résolut le problème d'une façon aussi simple qu'élégante.

Ce n'est que fort longtemps après que les avantages si importants des courants alternatifs furent mieux compris et il faut arriver jusqu'en 1891 pour trouver un essai en grand d'application industrielle de ces courants. Depuis cette époque, ils se sont développés d'une façon intense, une à

une, ont disparu les difficultés considérables que l'on avait tout d'abord rencontrées dans l'exploitation des distributions par courants alternatifs et les propriétés particulières de ces courants, systématiquement étudiées, ont pu être rationnellement utilisées.

Ici encore la Science pure a tiré profit des progrès de l'industrie; les praticiens ont posé aux savants des questions auxquelles ceux-ci n'auraient sans doute pas songé mais qu'ils surent résoudre, et, à leur tour, ils rendirent ainsi les plus précieux services à l'application; ainsi, entre l'usine et le laboratoire, se firent les échanges les plus féconds.

Quelques définitions sont nécessaires pour comprendre le langage actuellement employé par les électriciens et pour se rendre compte de la raison d'être d'appareils nouveaux, spécialement appropriés aux courants alternatifs et qui sont aujourd'hui d'un excellent usage.

Un courant alternatif est un courant qui circule tantôt dans un sens, tantôt en sens contraire; mais, en pratique, les courants alternatifs utilisés sont toujours périodiques, c'est-à-dire que l'intensité repasse par les mêmes valeurs à des intervalles de temps égaux; la période est alors le temps le plus court au bout duquel le courant reprend identiquement la même valeur et les mêmes propriétés; la fréquence est le nombre de périodes par seconde.

Le premier élément à mesurer dans le cas d'un courant alternatif est la fréquence; divers dispositifs ont été proposés. M. Kampf utilise à cet effet un phénomène de résonnance; un électro-aimant excité

par le courant que l'on veut étudier peut être déplacé devant une série de lames vibrantes susceptibles d'exécuter chacune un nombre de vibrations connu par seconde, mais variable avec chaque lame. Quand l'électro arrive devant la lame dont la fréquence est égale à celle du courant, cette lame vibre énergiquement et rend un son intense. M. P. Janet a imaginé un dispositif des plus ingénieux qui permet, outre la fréquence, de déterminer d'autres éléments du courant. Sur un tambour enregistreur, on place une feuille de papier imbibé d'une solution de ferrocyanure de potassium et d'ammonium et l'on appuie sur ce papier un style d'acier à pointe un peu émoussée. Quand on fait passer un courant alternatif à travers le papier, par l'intermédiaire du style, on observe, chaque fois que le potentiel de la pointe dépasse une certaine valeur positive, une trace bleue due à la décomposition électrolytique du cyanure. En faisant tourner le tambour enregistreur avec une vitesse connue, on peut, du nombre de traits courts dessinés ainsi en bleu, déduire la période du courant.

Pour connaitre complètement un courant alternatif, d'autres déterminations, plus délicates sont nécessaires ; il faudrait savoir à chaque instant quelle est son intensité et quelle tension il détermine entre les extrémités du circuit. Le premier procédé qui peut conduire à la solution de ce difficile problème fut indiqué, dès 1882, par M. Joubert. Cet éminent physicien fut ainsi un véritable précurseur, il comprit, à une époque où ils étaient bien peu utilisés, le haut intérêt des courants alternatifs, et il donna

une méthode ingénieuse et entièrement nouvelle pour les étudier. L'idée essentielle consiste à répéter les effets relatifs à la même phase, de manière à obtenir des indications permanentes. Veut-on étudier la tension fournie par un alternateur, on monte, sur l'arbre de la machine, un interrupteur à contacts momentanés, calé de telle manière que les contacts avec un électromètre convenable s'établissent à une phase déterminée de la force électromotrice; l'aiguille de l'électromètre prendra alors une déviation permanente qui correspond à la différence du potentiel relative à cette phase. Si l'électromètre est un électromètre à quadrants, il faut, bien entendu, l'employer dans des conditions telles que le sens de la déviation soit indépendant du sens de la force électromotrice. M. Joubert a imaginé un procédé, aujourd'hui classique, pour résoudre ce problème. M. P. Janet a plus tard indiqué le principe d'une méthode stroboscopique qui pourrait être employée à la place de la méthode de M. Joubert ; dans la suite d'autres méthodes également intéressantes ont été proposées.

M. Hospitalier, par exemple, a imaginé un appareil élégant, auquel il a donné le nom d'ondographe, composé essentiellement d'un commutateur tournant qui permet de charger un condensateur et de le décharger sur un appareil enregistreur convenable destiné à donner, suivant les cas, la tension ou l'intensité du courant. Le commutateur, qui fait 999 tours pendant qu'un moteur alimenté par le courant à étudier en fait 1000, saisira le phénomène périodique dans une phase qui variera de $\frac{1}{1000}$ à chaque tour ; la déviation de l'appareil enregistreur

variera donc lentement, de telle façon qu'elle décrit une période complète durant le temps que le courant présente lui-même mille périodes. La méthode donne d'excellent résultats, mais elle ne convient évidemment qu'au cas où le phénomène se reproduit sans altération pendant un nombre considérable de périodes.

Au lieu d'employer une méthode indirecte, donnant pour ainsi dire par points, les variations d'un courant, on peut utiliser des méthodes directes qui permettent d'inscrire sans retard et aussi fidèlement que possible les valeurs successives du courant.

Il faudrait, pour réaliser une telle inscription, posséder un galvanomètre dont les déviations fussent à chaque instant proportionnelles à l'intensité du courant ; mais les appareils ordinaires ne répondent pas à cette nécessité ; outre la force directrice provenant du courant qui la sollicite, l'aiguille aimantée d'un galvanomètre est soumise, d'une part à la force d'inertie, et d'autre part à des forces d'amortissement provenant des frottements et des phénomènes d'induction. M. Blondel qui a fait, sur ce sujet, une série remarquable d'études poursuivies avec une méthodique persévérance, est arrivé à trouver dans quelles conditions il convenait de se placer pour diminuer le plus possible ces actions perturbatrices. Il a été ainsi amené à construire des oscillographes qui, dans le cas des courants alternatifs industriels de 25 à 100 périodes par seconde, donnent commodément des résultats d'une précision très suffisante pour la pratique.

Une solution théoriquement plus complète du problème a été donnée, en 1897, par M. H. Abraham ; cet habile physicien a eu l'idée de compenser automatiquement et rigoureusement l'effet perturbateur des forces d'inertie et d'amortissement par des effets égaux et de sens contraire dus à des phénomènes d'induction mutuelle entre le circuit du courant à étudier et le circuit propre du galvanomètre. Le rhéographe de MM. Abraham et Carpentier est d'un réglage un peu délicat mais, entre des mains exercées, il permet non seulement l'étude des courants alternatifs ordinaires mais encore celle des décharges oscillantes ayant une période de $\frac{1}{10000}$ de seconde, étude qui serait impossible avec un oscillographe ordinaire.

Grâce à des appareils comme ceux-là, ou à d'autres analogues comme celui de MM. Ader et Cauro ou comme celui de M. Braun dans lequel se trouve réalisée une idée ingénieuse qu'avait indiquée M. Hess, — l'idée de s'adresser à un indicateur dénué d'inertie en utilisant la déviation des rayons cathodiques par un champ magnétique, — on est aujourd'hui en mesure de tracer, avec une assez grande certitude, la courbe des courants produits par les électromoteurs industriels.

On s'aperçoit ainsi aisément que le courant n'affecte jamais la forme la plus simple des fonctions périodiques, la forme d'une fonction harmonique u sinusoïdale ; mais, d'après un théorème célèbre, ; théorème de Fourier, toute fonction périodique eut être considérée comme la somme de fonctions armoniques ayant des fréquences qui sont des mul-

tiples entiers de la fréquence de l'une d'entre elles, et l'on peut se proposer de rechercher les éléments harmoniques sinusoïdaux qui composent un courant périodique donné.

Le problème est tout à fait semblable à celui qu'a résolu Helmholtz lorsqu'il a fait l'analyse des sons. On sait qu'il a attribué le timbre d'un son à la superposition au son principal d'harmoniques divers plus ou moins intenses, et de même que, dans le cas du phénomène acoustique, on peut, ou bien employer une méthode d'inscription donnant la courbe caractéristique du son d'où, par des procédés analytiques, l'on déduira les harmoniques qui le composent, ou bien au contraire, utiliser des résonateurs qui jouissent de la propriété de permettre à certains harmoniques de prendre de la prépondérance ; de même il est loisible, en électricité, de se servir de l'oscillographe qui fournira la forme du courant ou bien de mettre en œuvre des appareils qui renforcent les harmoniques électriques.

M. Armagnat a montré comment, avec deux oscillographes convenablement disposés, on pouvait, grâce à la résonnance, obtenir l'amplitude et la phase d'un harmonique déterminé par rapport à celles de l'harmonique fondamental ; on obtient ainsi les renseignements les plus précieux sur la constitution des courants étudiés.

Quelle que soit d'ailleurs la forme du courant, l'oscillographe donne la valeur que possède à chaque instant l'intensité, ou, comme l'on dit, l'intensité *instantanée* ; cette grandeur est fort importante à connaître, mais cependant beaucoup d'actions pro-

duites par le courant dépendront plutôt de l'intensité dite intensité *efficace* ; on sait que l'on entend par là l'intensité du courant continu qui, dans le même temps et dans la même résistance, produirait le même dégagement de chaleur ou si l'on préfère la racine carrée du carré moyen de l'intensité du courant. Il vient immédiatement à l'idée de mesurer l'intensité efficace par le dégagement de chaleur produit dans un fil, c'est ce que l'on fait avec les ampèremètres thermiques, tels que l'ampèremètre de Hartmann et Braun.

On appelle, de même, tension efficace entre deux points A et B, pris sur un circuit parcouru par un courant alternatif, la racine carrée du carré moyen de la tension pendant une période ; cette tension se mesure à l'aide d'un voltmètre thermique comme le voltmètre de Cardew, ou encore à l'aide d'un électromètre à quadrants où l'on réalise le montage indiqué par M. Joubert.

Intensité efficace et tension efficace sont donc, dans l'application, les grandeurs les plus intéressantes à connaître ; il ne faut cependant pas perdre de vue que certains phénomènes pourront dépendre non de la tension efficace mais d'une valeur particulière de la tension instantanée et particulièrement de la valeur maxima ; pour un courant sinusoïdal, la tension maxima dépasse de 41,4 p. 100 la tension instantanée donnée par les voltmètres, il conviendra donc d'avoir, dans une distribution, des isolants qui résistent non à 50.000 volts, si la distribution a lieu sous ce voltage, mais à 75.000, puisque ces isolants se trouveront, pendant un instant, soumis

à ce voltage, un nombre de fois par seconde qui est le double de la fréquence.

Dans le cas du courant continu, la puissance disponible entre deux points est le produit de l'intensité par la tension ou différence de potentiel qui existe entre ces deux points ; dans le cas du courant alternatif, il est évident que la puissance est variable en fonction du temps, mais l'énergie par période est toujours la même et l'on pourrait, dès lors, supposer que l'on obtiendra la puissance moyenne, ou énergie par unité de temps, en multipliant la valeur de la tension efficace par l'intensité efficace. Mais, en général, il n'en sera pas ainsi ; il faudra bien pour avoir la puissance, faire le produit précédent, mais on devra ensuite le multiplier lui-même par un facteur toujours plus petit que l'unité et que l'on nomme souvent le facteur de puissance.

Ainsi, si nous employons une génératrice à maintenir une distribution à potentiel constant, elle nous fournira toujours le même nombre de volts et le même nombre d'ampères ; mais, pour évaluer le travail fourni, nous devrons frapper le produit du nombre d'ampères et du nombre de volts par un coefficient plus petit que l'unité, et la puissance apparente de la machine augmentera, si nous savons nous arranger pour que ce facteur s'approche de plus en plus de l'unité.

Dans les débuts, l'on ne savait pas prendre à cet égard les précautions nécessaires et l'on se trouvait avoir des facteurs de puissance souvent inférieurs à 0,75 ; aujourd'hui, l'on parvient, par une utilisation rationnelle des appareils, à élever ces facteurs jusqu'à 0,90 environ.

Mais, pour obtenir une telle amélioration, il a fallu que les ingénieurs comprissent parfaitement l'origine de ce coefficient : il provient des phénomènes de self-induction. Lorsqu'un courant variable traverse une bobine, outre la tension créée entre ses bornes par le courant lui-même, il se produit dans le circuit une force électromotrice d'induction ; nous savons, en effet, qu'un courant qui passe dans un circuit donne naissance à un flux magnétique ; mais, si le courant est variable, le flux l'est également, et si le flux varie, une force électromotrice apparaît ; cette force électromotrice est naturellement d'autant plus grande que le circuit est plus inductif, c'est-à-dire que la variation de flux sera plus considérable ; no augmente cette variation en augmentant le nombre de spires, et en mettant dans la bobine un noyau de fer.

Dans ces conditions, la tension aux bornes devient la somme de la tension primitive et de celle que produit cette force électromotrice ; s'il s'agit d'un courant périodique, les deux parties de la somme sont également périodiques et ont, toutes deux, la même fréquence que le courant ; en s'ajoutant, elles donnent encore une fonction de même période, mais *décalée* par rapport à ce courant.

On entend par là que la tension et le courant ne sont pas dans la même phase, tels deux pendules qui ont même durée d'oscillation, mais qui ne passent pas en même temps à la verticale, la tension et le courant ne sont pas nuls au même instant. C'est ce décalage qui introduit, dans l'évaluation de la puissance, le facteur dont il a été question et l'on

démontre même très simplement que ce facteur est le cosinus de la différence de phase entre le courant et la tension.

Au lieu d'envisager ainsi les choses, certains électriciens ont pris l'habitude de considérer plutôt le courant comme formé par la superposition de deux courants partiels; l'un, toujours proportionnel à la tension, en phase avec elle, et absorbant ou dégageant par période la même énergie que le courant total, on l'appelle le courant *watté;* l'autre, décalé d'un quart de période sur la tension, absorbant dans un quart de période l'énergie qu'il dégage dans le quart de période suivant, c'est le courant *déwatté.*

Les phénomènes, comme le dégagement de chaleur, le travail d'un moteur, qui dégagent ou absorbent une puissance moyenne par période qui n'est pas nulle, doivent être considérés comme produits par des courants wattés; ceux qui, au contraire, correspondent à une puissance moyenne nulle se rapportent aux courants déwattés : ainsi l'aimantation d'un milieu, la charge d'un condensateur nécessitent des courants déwattés.

De quelque façon d'ailleurs que l'on envisage les choses, il faudra toujours s'adresser à l'expérience pour déterminer la puissance du courant; on peut le faire, d'une façon rapide, avec des appareils industriels nommés wattmètres ou bien l'on peut employer des méthodes qui exigent soit trois ampèremètres, soit trois voltmètres, ou mieux encore, dans le cas où les courants s'éloignent trop de la forme sinusoïdale, on utilisera un procédé très ingénieux, indiqué par M. Potier.

Nous nous sommes particulièrement occupés de l'influence de la self-induction sur la valeur de la puissance, parce que c'est surtout le travail qui doit nous intéresser pour les applications; mais on peut se placer à un autre point de vue, et examiner quelles modifications ces phénomènes de self-induction vont apporter, dans le cas des courants alternatifs, aux lois qui régissent les courants continus.

On sait que, d'après la loi d'Ohm, l'intensité d'un courant continu est le quotient de la force électromotrice qui existe dans un circuit par la résistance de ce circuit; si l'on a affaire à une force électromotrice périodique, on peut considérer que le phénomène de self-induction produit deux effets : d'une part, un décalage du courant par rapport à la force électromotrice ; d'autre part, une augmentation apparente de la résistance; et l'on démontre aisément que l'intensité efficace est le quotient de la force électromotrice efficace par une quantité plus grande que la résistance et que l'on nomme l'impédance.

L'impédance a une valeur facile à calculer; son carré est égal à la somme du carré de la résistance ordinaire, la résistance ohmique, et du carré du produit du coefficient de self-induction du circuit par la pulsation du courant (la pulsation étant le produit par 2 π de la fréquence).

Cette seconde partie de la somme est souvent désignée sous le nom de réactance.

Le décalage est également donné par une expression très simple : il est d'autant plus grand que la self-induction et la fréquence sont plus grandes et

que la résistance est plus petite ; exactement le courant est décalé en arrière de la force électromotrice d'un angle dont la tangente est égale au rapport de la réactance à la résistance.

Si l'on envisage les deux cas extrêmes, on se rend compte du rôle de ces diverses quantités. Imaginons que la self-induction ou que la fréquence soient très petites par rapport à la résistance proprement dite, alors la réactance est négligeable ; l'impédance se confond avec la résistance ; d'autre part, le décalage est nul. Le courant se comporte tout à fait comme un courant continu ; c'est alors le courant watté qui existerait seul.

Supposons, au contraire, que la fréquence devienne extrêmement grande ou que le coefficient de self-induction soit très élevé, la résistance ohmique devient négligeable devant la réactance et l'impédance se confond avec la réactance. D'autre part, l'angle de décalage devient un angle droit ; l'intensité du courant est en retard d'un quart de période par rapport à la force électromotrice ; seul le courant déwatté subsisterait.

On explique ainsi aisément les expériences, au premier abord paradoxales, que l'on effectue avec les courants de haute fréquence, comme ceux qu'a obtenus M. Elihu Thomson ; l'augmentation considérable de la résistance apparente se traduit par des phénomènes qui étaient bien de nature à surprendre les physiciens habitués seulement aux courants continus ; ainsi, par exemple, un simple anneau placé sur une bobine parcourue par un courant de haute fréquence, peut, malgré la faible

valeur de sa résistance, s'échauffer d'une façon très intense.

Une nouvelle différence essentielle entre les courants continus et les courants alternatifs apparaîtra, si l'on examine les effets produits par l'introduction d'un condensatenr dans le circuit.

Dans le cas d'un courant continu, un isolant, supposé parfait, oppose un obstacle absolu au passage de ce courant; tout au plus si la coupure est formée par la lame isolante d'un condensateur, pourra passer le faible courant, de courte durée, correspondant à la charge de ce condensateur.

Imaginons, au contraire, que l'on entretienne dans le circuit une différence de potentiel alternative, que nous supposerons, pour simplifier, sinusoïdale; alors même que le fil conducteur sera interrompu par le diélectrique, il sera parcouru par le courant alternatif qui correspond aux charges et décharges successives du condensateur; on dira, d'ailleurs, que le courant traverse aussi bien la lame isolante que les portions conductrices du circuit, si, avec Maxwell, on considère que, dans le diélectrique, se produisent des déplacements électriques capables de fermer le courant.

Abordant la question par le calcul, on parvient, sans difficulté, à établir que, dans le cas le plus général où le circuit contient ainsi un condensateur, et possède d'ailleurs une résistance et un coefficient de self-induction, l'intensité efficace est toujours égale à la force électromotrice efficace divisée par une quantité qui joue le rôle d'une résistance

et que l'on appelle, comme précédemment, l'impédance. On continue à désigner sous le nom de réactance, la quantité dont le carré s'ajoute au carré de la résistance pour donner le carré de l'impédance.

Mais cette réactance a maintenant une expression plus compliquée ; elle est, elle-même, la différence de deux termes : le premier dépend de la capacité et de la fréquence, le second de la self-induction et de la fréquence. Il résulte de là que ces deux termes opposent, en quelque sorte, leurs effets l'un à l'autre, ou, si l'on préfère, que l'introduction d'une capacité dans un circuit agit comme une diminution de la self-induction.

On peut même faire en sorte que les deux termes prennent la même valeur et alors la réactance deviendra nulle. Pour qu'il en soit ainsi, il faut que le produit de la self-induction par la capacité soit égal à l'inverse du carré de la pulsation. Si cette condition, que l'on appelle la condition de résonnance, est satisfaite, le circuit complexe se comporte entièrement comme un conducteur unique n'intervenant que par sa résistance ohmique, le courant alternatif devient semblable à un courant continu. A chaque instant l'intensité est égale au quotient de la tension par la résistance, et, d'ailleurs, le décalage n'existe plus.

Ainsi apparaît la possibilité de compenser les effets de la self-induction par l'emploi d'un condensateur ; il importe toutefois de remarquer que la capacité du condensateur convenable pour cet usage dépend de la fréquence et que, par suite, la compen-

sation réalisée pour une fréquence déterminée n'existerait plus pour une autre.

Remarquons enfin que le second terme de la réactance prendra, si l'on veut, une valeur supérieure à celle du premier terme ; l'inductance peut devenir négative ; dans ce cas le décalage sera aussi négatif. Il est donc possible, par l'introduction d'un condensateur dans un circuit alternatif, de produire une avance de phase du courant sur la force électromotrice.

Grâce à cette connaissance du rôle des condensateurs et de la self-induction, il est permis désormais de traiter les problèmes parfois compliqués qui se présentent dans la pratique et de déterminer, par exemple, complétement les courants qui se produisent dans des circuits dérivés.

C'est ainsi que l'on peut chercher à obtenir dans une portion de circuit, comprenant ou non des condensateurs, un courant d'intensité efficace indépendante de l'impédance propre de cette portion. Cette question fort importante, puisque de sa solution dépend la possibilité d'établir, avec des courants alternatifs, une distribution à intensité constante, a été résolue très élégamment par M. Boucherot.

Les calculs de ce genre sont, en général, assez pénibles ; on les simplifie beaucoup par l'emploi de méthodes graphiques ; on peut représenter la force électromotrice ou l'intensité d'un courant alternatif par un vecteur, en portant une longueur égale à cette force électromotrice ou à cette intensité (maximum ou efficace) dans une direction faisant, avec une axe fixe, un angle égal à la phase. On obtiendra la résultante d'un nombre quelconque d'intensités

ou de forces électromotrices par la règle de composition des vecteurs ; le vecteur résultant donnera, par sa longueur et sa direction, la résultante cherchée, en grandeur et en phase.

Il est à remarquer que ce procédé est identique à celui qui résulte immédiatement de la règle énoncée par Fresnel pour composer les vibrations lumineuses et résoudre les problèmes d'interférence et de diffraction. Le rapprochement s'explique naturellement : dans les deux cas, il s'agit des phénomènes périodiques, représentés par les mêmes fonctions. Il est néanmoins intéressant de remarquer qu'ici, encore, on rencontre un exemple de l'aide réciproque que se fournissent la théorie et la pratique. La manière dont les physiciens étaient parvenus à résoudre de délicats problèmes d'optique a servi de modèle aux ingénieurs pour déterminer les conditions d'une distribution électrique.

On utilise souvent aussi un artifice fondé sur l'emploi des imaginaires ; il suffit, pour avoir la solution d'une question relative à des courants alternatifs, d'appliquer les lois d'Ohm et de Kirchhoff à des quantités imaginaires convenablement définies ; on arrive ainsi à un certain nombre d'équations semblables à celles que l'on rencontre dans le cas des courants continus et on les traite comme s'il s'agissait, en effet, de courants continus. Les solutions sont imaginaires, mais il suffira, pour connaître la solution véritable, de conserver les parties réelles. Dans le fond, les deux procédés reviennent au même, un vecteur se représente en effet, si l'on veut, par une expression imaginaire, et, chaque fois que le

calcul nous fournira une valeur imaginaire, nous pourrons, sans aucune ambiguïté, tracer sur une épure le vecteur correspondant. Ainsi s'explique ce mode de représentation qui a un peu surpris au premier abord; l'intensité du courant et la force électromotrice peuvent être considérées comme figurées (en grandeur et en phase) par des vecteurs ou, si l'on préfère, par les quantités imaginaires qui représentent complètement ces vecteurs.

Steinmetz et beaucoup d'autres auteurs ont fait grand usage de cet artifice et l'on a pu ainsi résoudre les problèmes les plus compliqués et les plus importants. Il ne faut pas toutefois se dissimuler que ces formules restent, pour certains esprits, quelque peu mystérieuses et peuvent être assez dangereuses dans l'application.

D'autre part, les méthodes graphiques sont souvent bien pénibles; la règle, l'équerre, le compas ne se manient pas toujours avec facilité. Beaucoup d'électriciens préfèrent maintenant employer une méthode fondée sur la séparation de la puissance wattée, ou puissance réelle, et de la puissance déwattée, ou magnétisante; c'est à M. Boucherot que l'on doit cette technique extrêmement commode qui conduit toujours à des calculs faciles, à de simples opérations d'arithmétique correspondant à la véritable réalité. On établit aisément que les puissances réelles s'ajoutent algébriquement, qu'il en est de même pour les puissances magnétisantes et que la puissance apparente, en chaque portion d'un réseau, est la racine carrée de la somme des carrés des puissances réelle et magnétisante. Ce théorème,

démontré d'abord dans le cas des courants sinusoïdaux, étendu par M. Swyngedaun et par M. Nouguier à d'autres cas, est le point de départ d'une méthode dont M. Boucherot, par de beaux exemples, a montré la simplicité et la fécondité.

§ 5. — LES COURANTS POLYPHASÉS ET LES CHAMPS TOURNANTS

Le courant alternatif dont nous avons parlé jusqu'ici est le courant alternatif simple, c'est celui que l'on a utilisé dans les premières installations ; il convenait bien à l'éclairage, deux fils seulement permettent, comme dans le cas du continu, une distribution simple et économique. Aujourd'hui encore, ce mode de distribution est très répandu, mais un très grave inconvénient apparut lorsque se développèrent les applications mécaniques de l'énergie électrique.

Les moteurs à courants alternatifs sont des appareils imparfaits ; nous reviendrons sur cette importante question des moteurs, mais, dès à présent, nous pouvons aisément comprendre comment le courant alternatif, s'annulant avant de changer de sens, cesse d'agir, pendant l'instant correspondant, sur l'organe mobile d'un moteur. Il existe donc de véritables points morts que l'on ne peut franchir qu'en établissant entre les périodes du courant et la vitesse du moteur une certaine concordance.

On a comparé avec raison ces points morts à à ceux que l'on connaît dans les machines à vapeur ou dans les moteurs à explosion et qui sont les points où s'arrête le piston aux extrémités de sa

course. Et de même que, dans le cas des machines thermiques, on élimine la fâcheuse influence de ces points, en accouplant plusieurs cylindres dont les pistons sont décalés les uns par rapport aux autres de telle sorte qu'au moment où l'un des pistons cesse d'agir, parce qu'il passe par un point mort, les autres puissent entraîner l'arbre commun, avec lequel ils sont tous en connexion ; de même, on supprimera l'effet des points morts électriques, en associant plusieurs courants alternatifs décalés les uns par rapport aux autres et ne s'annulant par conséquent pas au même instant ; ces courants ainsi associés sont des courants polyphasés.

Les propriétés essentielles des courants polyphasés ont été signalées, en 1888, par un savant italien Ferraris, et, à peu près à la même époque, par Tesla en Amérique ; mais il a fallu plusieurs années pour que leur emploi devînt pratique. Il convient de citer particulièrement les noms de MM. Maurice Leblanc et Boucherot, parmi ceux des électriciens dont les remarquables travaux ont permis l'utilisation de ces courants et aussi celui de M. Potier qui a réussi à en donner une théorie simple et claire.

Sans entrer pour le moment dans les détails de construction des générateurs polyphasés, il est possible d'expliquer, en quelques mots, la manière dont, en principe, on obtient de tels courants. Imaginons une suite de pôles magnétiques disposés, sur une couronne circulaire, à égale distance les uns des autres, et qui soient alternativement des pôles nord et des pôles sud.

Supposons maintenant qu'une bobine se déplace

devant ces pôles avec une vitesse constante, elle sera parcourue par un flux alternatif, elle deviendra donc le siège d'un courant alternatif dont la période est le temps qui s'écoule entre les passages du milieu de la bobine devant les axes de deux pôles consécutifs de même nom.

Si, au lieu d'une bobine, on en considère trois dont les centres sont distants du tiers de la distance de deux pôles nord consécutifs, il est aisé de comprendre qu'elles vont être, toutes les trois, parcourues par des courants alternatifs tout à fait semblables, mais décalés l'un par rapport à l'autre d'un tiers de période; ces courants sont des courants triphasés. Il est bien évident d'ailleurs que si, au lieu de trois bobines, on en avait deux, quatre... on aurait une combinaison diphasée, tétraphasée, mais, en pratique, les courants triphasés sont à peu près seuls employés dans les distributions à courants alternatifs polyphasés.

Ce système de transmission d'énergie semble, au premier abord, exiger trois lignes différentes, c'est-à-dire six fils entre les deux stations et, par suite, entraîner de coûteuses complications, mais, par un artifice simple et ingénieux, on peut réduire à trois le nombre des fils nécessaires.

Au lieu de garder les trois bobines génératrices isolées, nous allons les réunir par leurs extrémités voisines; les forces électromotrices produites dans chacune d'elles resteront toujours décalées de 1/3 de période l'une par rapport à l'autre. Joignons alors les extrémités communes de la bobine 1 et de la bobine 2 à une première bague, les extrémités

communes de la bobine 2 et de la bobine 3 à une seconde bague, et de même encore, les extrémités communes de 3 et 2 à une troisième bague, nous produirons sur ces bagues des tensions triphasées comme les forces électromotrices. Appuyant alors, sur les bagues, des frotteurs en relation avec trois fils de ligne, nous aurons dans ces fils des courants triphasés que nous recueillerons, à la station réceptrice, dans trois circuits partiels ayant deux à deux une extrémité commune et formant un circuit fermé.

Au lieu de ce montage que l'on appelle montage en triangle, on peut réunir entre elles les extrémités antérieures des trois bobines et réunir ensuite à trois bagues, communiquant avec trois fils de ligne. les extrémités postérieures; on adopte, bien entendu, une disposition analogue pour les récepteurs et l'on a ce que l'on appelle une distribution en étoile.

Les deux couplages ainsi définis n'ont pas exactement les mêmes propriétés. Dans le couplage en étoile, les trois extrémités antérieures des bobines sont mises au même potentiel, puisqu'elles ont un point commun que l'on désigne sous le nom de point neutre, et l'on démontre aisément que la tension efficace entre deux fils est égale à 1,74 fois la tension efficace entre un des fils et le point neutre. Le courant qui circule entre le point neutre et l'une les bagues est évidemment le même que celui qui circule dans le fil de ligne réuni à cette bague.

Il n'y a pas de point neutre dans le couplage en riangle, et comme à un fil de ligne aboutissent les

deux branches du triangle, le courant qui va passer dans ce fil est évidemment plus intense que celui qui provient d'une seule branche; le calcul permet d' établir qu'il est exactement égal à 1,74 fois le courant qui circule dans chaque branche.

Les conditions sont, en quelque sorte, inverses l'une de l'autre pour les deux montages et il importe de le comprendre pour diverses applications.

Dans l'un ou l'autre cas, la puissance s'évaluera d'ailleurs sans difficulté; elle est la somme des puissances de chacun des courants alternatifs simples, et comme les trois *phases* sont égales, elle est égale à trois fois le produit de la tension par le courant et par le facteur de puissance. Il résulte de là que, quel que soit le mode de montage, la puissance fournie par une génératrice triphasée et absorbée par un appareil d'utilisation triphasé est toujours représentée par 1,74 fois le produit de la tension entre deux des fils de ligne par l'intensité du courant circulant dans un de ces fils et par le facteur de puissance.

La grande importance des courants polyphasés tient à ce que, comme l'a montré G. Ferraris, ces courants permettent d'obtenir un champ magnétique tournant sans qu'il soit nécessaire de produire une rotation mécanique de bobines ou d'aimants.

Les champs tournants sont connus depuis longtemps et leur propriété essentielle a même été mise en évidence par Arago, huit ans avant la découverte de l'induction par Faraday, c'est-à-dire à une époque où cette propriété, qui est une conséquence simple

des phénomènes d'induction, ne pouvait être comprise. Il n'est pas sans intérêt de rappeler qu'en 1826 Poisson avait donné du magnétisme de rotation une explication manifestement inexacte ; cette explication avait suffisamment satisfait les contemporains et même, parmi eux, un esprit aussi averti qu'Arago, pour que tous estimassent qu'il était inutile de chercher à approfondir la question ; il contenait cependant en germe, ce phénomène négligé, la découverte capitale de l'induction.

Nous dirons qu'en un point de l'espace il existe un champ magnétique tournant lorsque la force, qui s'exercerait sur un pôle placé en ce point, change à chaque instant de direction de telle façon que le vecteur qui la représente tourne constamment autour de son origine, tout en restant dans un même plan.

Rien n'est plus simple que d'obtenir un champ tournant, puisqu'il suffira, à cet effet, de faire tourner les pôles d'un aimant.

L'expérience fondamentale d'Arago consistait à montrer qu'une masse métallique quelconque, placée dans un champ tournant, prend elle-même un mouvement de rotation et que, si elle n'éprouve aucune résistance, elle tourne avec la même vitesse que le champ.

Tout se passe comme si, par quelque action invisible de viscosité ou de frottement, le champ, pourtant immatériel, entraînait dans sa rotation la masse métallique.

L'explication est très simple : le champ, en tournant, donne naissance dans le corps conducteur à

des courants d'induction qui le traversent d'une manière très compliquée; ce sont comme on les appelle aujourd'hui, des courants de Foucault. Ils ont, ces courants, des formes dont il serait souvent bien difficile de se rendre compte, mais il sont d'un sens tel qu'ils obéissent a la loi de Lenz ; ils s'opposent par conséquent au mouvement de l'aimant, et par suite des actions électromagnétiques réciproques, l'aimant agissant à son tour sur ces courants les attire et entraîne avec eux, dans sa rotation, la masse métallique elle-même.

On comprend donc que, grâce à un champ tournant, on puisse faire tourner un corps sans aucun mécanisme matériel et sans aucun contact électrique avec l'extérieur. Mais il est clair que l'on n'aurait pas, au point de vue de la pratique, obtenu un résultat bien intéressant si, pour produire le champ tournant, il fallait nécessairement faire tourner un aimant; il serait alors tout aussi simple de faire directement tourner la masse métallique. Les propriétés des courants polyphasés font apparaître la question sous un jour nouveau.

Considérons, pour fixer les idées, trois bobines disposées de telle manière que leurs axes forment un triangle équilatéral et supposons chacune de ces bobines excitée par une phase d'une distribution triphasée. Au centre du triangle existe un champ magnétique, qui, à un instant donné, a une certaine direction et une certaine grandeur et ce champ est la résultante des trois champs composants produits par les trois bobines.

Au bout d'un temps égal à un tiers de période,

les intensités, qui sont précisément décalées l'une par rapport à l'autre d'un tiers de période, ont changé dans les bobines, de telle manière que la seconde bobine est à ce moment parcourue par le courant même qui parcourait la première au début, et que dans la troisième circule alors celui qui naguère circulait dans la seconde.

Les flux magnétiques ont suivi les variations des courants qui leur ont donné naissance et l'on voit que le champ au centre est devenu le même que celui qui se produirait si, les courants restant constants, le système des trois bobines avait tourné solidairement autour de ce centre d'un angle de 120° ; en d'autres termes, au bout d'un temps égal à un tiers de période, le champ a conservé son intensité initiale mais a tourné d'un angle de 120°. On comprend ainsi comment il se fait que, d'une manière générale, la résultante des trois champs, produits par les trois phases, varie constamment en grandeur et en direction ; elle tourne dans le plan qui contient les trois axes de manière à effectuer un tour complet pendant la durée d'une période.

Pour reprendre une comparaison qui, déjà, nous a servi, nous dirons que l'ensemble des trois bobines est analogue à une combinaison que l'on rencontre souvent dans les treuils à vapeur et où l'on voit trois pistons identiques attaquant un arbre qui est commun à trois manivelles calées à 120°; les mouvements de va-et-vient des trois pistons sont décalés à 120° mais la rotation de l'arbre s'effectue d'une façon absolument régulière, sans points morts.

Avec la combinaison électrique nous pourrons obtenir un appareil nommé *rotor* qui, grâce aux réactions réciproques du champ tournant et des courants induits, prendra un mouvement de rotation continu sans qu'il soit nécessaire d'établir aucune connexion matérielle entre lui et l'extérieur.

CHAPITRE IV

Les machines génératrices.

---

§ 1. — LA DYNAMO A COURANT CONTINU.

Peu de temps après que Faraday eut publié ses recherches, Pixii construisit, sous la direction d'Ampère, un appareil propre à montrer en grand les effets d'induction qu'on pouvait produire avec des aimants; le courant obtenu dans le fil d'un électro-aimant par la rotation d'un aimant voisin est naturellement alternatif, un commutateur installé sur l'axe de rotation permettait de redresser les courants induits avant de les envoyer dans le circuit extérieur.

Clarke, Page, imaginèrent ensuite des machines un peu différentes, qui furent, on le sait, employées pour certaines applications médicales mais dont la puissance était beaucoup trop faible, et surtout le rendement trop mauvais, pour qu'elles pussent entrer véritablement dans la pratique industrielle.

On obtint des puissances plus considérables, lorsqu'on songea à associer des bobines induites,

comme on savait associer des éléments de pile, et il y a déjà près d'un demi-siècle qu'une société, l'*Alliance*, exploitait en France des machines capables d'actionner au phare de la Hève des lampes électriques à courant alternatif correspondant à dix mille carcels. Mais, quand on voulait redresser le courant, il fallait munir ces machines d'un commutateur, dont le fonctionnement, difficile, irrégulier, était accompagné d'étincelles destructrices qui absorbaient une grande partie de l'énergie. Il semblait cependant, à cette époque, que l'électricité ne prendrait véritablement place dans la grande industrie que le jour où l'on aurait trouvé un procédé pratique pour obtenir, par l'induction, un courant continu et c'est ce problème que plusieurs inventeurs s'efforcèrent pendant longtemps de résoudre.

On doit mentionner, parmi les travaux qui préparèrent l'évolution décisive, ceux de Siemens et de Wilde et rappeler surtout le moteur électrique réversible que décrivit en 1864 un italien Pacinotti ; cette machine renfermait en germe l'idée que Gramme allait quelques années plus tard (en 1869) appliquer en grand à de puissantes machines.

La solution proposée par Gramme était d'apparence fort paradoxale. Au premier abord, on pouvait croire que, dans les conditions où l'ingénieux inventeur se plaçait, aucun courant électrique ne se produirait et telle était bien, dans les débuts, la pensée des physiciens les plus éminents. Un amateur éclairé qui a consacré beaucoup de temps à de fort intéressantes recherches expérimentales, M. Worms de Romilly, avait, un peu avant Gramme, imaginé un

dispositif analogue au célèbre anneau, et il avait pu construire une machine qui, grâce à ce dispositif, donnait un courant continu; cet essai n'avait été cependant aucunement encouragé. Il m'a été donné de lire une lettre, adressée à M. de Romilly par l'un des plus illustres savants français, et où ce savant démontre, par un raisonnement en apparence fort rigoureux, que, si la machine fournit du courant, c'est par suite de quelque défectuosité, d'un manque de symétrie. mais que, construite dans les conditions exactes où l'on a voulu se placer, elle ne saurait que rester entièrement inerte.

Gramme, qui était un simple ouvrier, peu habitué à considérer les choses du point de vue de la théorie, mais qui avait manié beaucoup d'appareils électriques, ne s'embarrassa pas de raisonnements abstraits et ne se laissa pas intimider par sa propre audace, dont il n'apercevait pas, d'ailleurs, toute l'étendue. Guidé par un véritable instinct de la réalité, il construisit cette machine dont on peut dire que l'invention est le point de départ d'un mouvement industriel si considérable qu'on doit remonter à l'introduction de la vapeur pour trouver son équivalent.

Il n'est pas besoin d'ajouter que la découverte de Gramme n'est, en vérité, nullement en contradiction avec la théorie ; mais nous rencontrons ici encore un exemple où l'excès de prudence du savant, qui veut n'avancer que lorsque toutes les difficultés sont écartées, a failli retarder gravement le progrès. Une fois que l'on eut constaté que la machine fonctionnait, il fut facile de voir par où péchait le rai-

sonnement qui, d'avance, la voulait condamner à l'inaction.

Ajoutons, d'ailleurs, que la théorie reprit rapidement ses droits, remise dans la bonne voie par le secours imprévu que lui apporta un robuste ouvrier, elle sut à son tour redevenir la conseillère nécessaire dont les ingénieurs écoutent, avec tant de profit, les avis éclairés.

Il serait sans doute de peu d'utilité de refaire ici un exposé élémentaire de la théorie bien connue des dynamos à courant continu; rappelons seulement, avant d'examiner les progrès récents de ces machines, les principes essentiels sur lesquels repose la solution simple de cette importante question: le redressement et la continuité du courant.

Dans les machines antérieures à celle de Gramme, toutes les parties du circuit induit passaient simultanément par les mêmes influences alternatives, et le commutateur établissait une discontinuité brusque qui se traduisait par des phénomènes de self-induction intenses; au contraire, dans l'induit Gramme, les diverses sections du circuit sont soumises successivement, et non plus simultanément, aux mêmes variations de flux, et la prise de courant se fait toujours sur les spires qui sont à un moment où le flux qui les traverse reste à peu près invariable, c'est-à-dire qui sont telles qu'entre leurs bornes la différence de potentiel est sensiblement nulle; la discontinuité amenée par la mise en relation de ces spires avec le circuit extérieur est négli-

geable, et l'on peut ainsi obtenir une différence de potentiel presque rigoureusement constante entre les collecteurs; cette différence est la somme des tensions produites dans les spires associées en série. Grâce à la forme symétrique de la machine et à l'ingénieuse disposition de l'anneau, aucune modification importante ne se produit dans le flux magnétique par la rotation de l'anneau; le flux coupé, pour une vitesse constante, reste constamment le même, et, par suite, la différence de potentiel totale recueillie demeure également invariable.

La dynamo à courant continu possède donc ce caractère essentiel que les points de contact du bobinage induit avec le circuit extérieur sont fixes par rapport au flux. Deux cas peuvent se présenter.

Ou bien le flux tourne, et il faut alors que les prises de courant soient entraînées dans une rotation de même sens et possédent une vitesse angulaire égale à celle du flux; cette disposition, nécessitant des balais tournants, entraîne de grandes complications mécaniques, et elle n'a guère été employée que dans un cas particulier: un célèbre ingénieur suisse, M. Thury, qui, malgré les succès du courant alternatif pour les transports d'énergie à distance, est resté le partisan convaincu du continu et, pour ainsi dire, le champion persévérant et habile de cette forme de courant, a construit une génératrice à induit fixe et inducteurs mobiles et balais tournants, qui fournit une tension de 25,000 volts.

Ou bien, et c'est la règle générale, le flux reste fixe dans l'espace, les inducteurs sont immobiles

tandis que l'induit tourne, le courant est recueilli par des conducteurs qui frottent sur le collecteur et que l'on nomme des balais.

Cet induit doit avoir une perméabilité très grande, de façon à concentrer le mieux possible le flux produit par l'inducteur; il est formé d'une carcasse en tôles minces, isolées les unes des autres par du papier ou simplement par une couche d'oxyde ; ce feuilletage est nécessaire pour éviter les courants de Foucault qui, dans une masse de fer continue et, par suite, conductrice, se produiraient nécessairement, puisque la carcasse est soumise aux mêmes variations de flux que l'enroulement auquel elle sert de support. Ces courants de Foucault agiraient comme une sorte de frottement qui absorberait, en pure perte, une grande partie de la puissance dépensée pour faire tourner l'induit.

Dans les machines industrielles, les tôles sont percées de trous qui permettent à l'air de circuler et de refroidir, par ventilation, l'induit qui s'échauffe beaucoup pendant la marche.

Sur la carcasse sont enroulés des conducteurs formés, dans les dynamos puissantes, par de véritables barres de cuivre, très soigneusement isolées les unes des autres; il existe, on le sait, trois systèmes d'enroulement, l'enroulement en anneau, l'enroulement en tambour et l'enroulement à disques peu employé aujourd'hui. Dans les machines multipolaires, très répandues, l'enroulement est constitué par la réunion d'autant de bobinages bipolaires qu'il y a de paires de pôles, et ces bobi-

nages sont associés soit en série soit en parallèle.

Les fils induits sont le plus souvent logés dans des rainures creusées dans la masse de fer du noyau. On trouve, à cette disposition, de grands avantages mécaniques; l'enroulement placé à la périphérie de l'induit est soumis à l'influence d'une force centrifuge élevée durant la rotation; il tend, par suite, à s'ouvrir, et il doit être maintenu par des frettes très résistantes. D'autre part, outre ces efforts radiaux, il existe des efforts tangentiels dus aux forces électromagnétiques, et si les spires n'étaient pas protégées, elles seraient le siège d'actions très intenses produites par le champ sur le courant qui les traverse. Ces forces considérables, s'exerçant sur du cuivre, c'est-à-dire sur un métal peu résistant, et dans des conditions mécaniques défavorables, ont constitué l'une des principales difficultés qu'ont rencontrées les premiers constructeurs. Elle n'a été vaincue, cette grave difficulté, que lorsqu'on a pu faire rentrer la construction des induits dans les formes mécaniques en noyant les tiges conductrices dans l'armature magnétique.

Mais on s'est trouvé alors en face d'un cas paradoxal d'induction qui n'a pas été parfaitement compris tout d'abord et au sujet duquel quelques idées inexactes sont, aujourd'hui encore, assez répandues. Le conducteur, entouré d'un cylindre de fer, est protégé contre l'influence du champ, et, s'il est parcouru par un courant, la force qui, sans l'introduction du cylindre, aurait agi sur lui, se trouve diminuée dans le même rapport que le champ; la

quantité dont elle a diminué se retrouve d'ailleurs dans une force qui agit, dans la même direction, sur le cylindre formant écran. Il résulte de mesures effectuées par M. Du Bois que l'on peut ainsi reporter sur le fer plus de 90 °/₀ de l'action qui, sans l'artifice adopté, s'exercerait sur les fils de cuivre.

Mais on pourrait croire que cet avantage ne saurait s'obtenir qu'au prix d'un inconvénient bien grave : si le champ est ainsi diminué, la force électromotrice induite ne va-t elle pas, par là même, perdre de sa valeur et, par suite, la machine perdre de sa puissance? Cette crainte n'est heureusement pas fondée et, en y réfléchissant, l'on comprend que si les lignes de forces sont moins denses dans la région protégée par l'écran, il faut, pour que le flux d'induction se conserve, qu'elles passent plus vite à l'intérieur que dans la région non protégée. Par suite, le flux coupé reste le même et la force électromotrice conserve la même valeur que si les inducteurs étaient à nu. D'autre part, la formation des courants de Foucault, à l'intérieur même des lames de cuivre, se trouve très diminuée et cette diminution est un nouvel avantage; ajoutons cependant que le fait de noyer dans le fer les conducteurs de l'induit augmente leur self-induction, et c'est là le seul inconvénient du procédé ; on y remédie partiellement en adoptant une disposition mixte, et l'on emploie souvent des induits dentés ou à rainure.

Pour recueillir le courant, on ne saurait pratiquement mettre en relation avec le circuit extérieur les deux seules spires qui passent exactement à la

ligne neutre, c'est-à-dire à cette ligne sur laquelle se fait le changement de sens du courant et où la force électromotrice induite dans la spire est nulle. Dans la réalité, le bobinage total est divisé en sections comprenant chacune plusieurs spires et les extrémités de ces bobines partielles aboutissent à deux lames du collecteur ; il convient que ces lames soient soigneusement isolées, et la difficulté que l'on rencontre à obtenir un isolement suffisant reste l'une des raisons qui limite les tensions dans le cas des dynamos à courant continu.

Sur le collecteur appuient les balais ; autrefois, on employait des frotteurs de cuivre ; aujourd'hui, sauf pour certaines applications électrochimiques, où l'on désire avoir des courants considérables, et, par suite, le moins de résistance possible, on se sert presque exclusivement de balais en charbon qui ont l'avantage de donner moins d'étincelles, à cause de leur médiocre conductibilité, et aussi, sans doute, à cause du dégagement d'acide carbonique qu'ils produisent aux points de contact portés à haute température.

Ces étincelles aux balais sont encore fort gênantes ; elles ont, dans les débuts, été grandement nuisibles au bon rendement et à la solidité de la machine. Elles sont dues, on le sait, aux phénomènes de self-induction qui prennent ici une importance énorme à cause de la rapidité avec laquelle le courant se renverse dans la section qui passe à la ligne neutre. Les tensions qui se développent ainsi, et que l'on désigne sous le nom de tensions de réactance, doivent être combattues soigneuse-

ment ; l'on ne connaissait guère, tout d'abord, d'autre procédé pour les atténuer que celui qui consistait à caler les balais en avant de la ligne neutre ; l'artifice était insuffisant et avait l'inconvénient de laisser perdre une partie de la puissance électrique produite.

Aujourd'hui on obtient de bien meilleurs résultats, soit par des procédés assez compliqués d'enroulement, soit par l'introduction sur la ligne neutre d'électro-aimants parcourus par le courant total de la machine. Ces méthodes demandent, pour produire les effets voulus, une connaissance très exacte de la forme du courant variable qui, durant la commutation, circule dans les diverses spires de l'induit, et une telle connaissance ne peut résulter que d'expériences semblables aux mesures les plus délicates que font les physiciens de profession. Ici encore, l'industrie et le laboratoire doivent se prêter un mutuel appui.

C'est encore par l'union intime de l'art de l'ingénieur et de la science du physicien que s'est constituée la théorie de la dynamo qui est arrivée aujourd'hui à une perfection assez grande pour que l'on puisse calculer d'avance les éléments d'une machine capable de remplir une fonction industrielle déterminée. Nous avons déjà dit que les principes essentiels de cette théorie avaient été posés par Hopkinson ; depuis lors, beaucoup d'électriciens, parmi lesquels il convient de citer M. Picou, sont arrivés à donner une forme, pour ainsi dire définitive, aux formules en usage dans les ateliers. Ces

formules ne sont que la traduction des lois physiques simples que nous avons antérieurement rappelées ; la considération du circuit magnétique et l'application de la loi d'Ohm et de la loi de l'induction suffisent pour fournir une base solide sur laquelle se peut édifier une sorte de codification des règles de construction.

Il faut cependant, pour calculer d'avance les éléments, associer aux lois physiques quelques remarques qui résultent sans doute des conditions nécessaires imposées par la commutation, conditions très complexes comme nous venons de l'exposer, et qui, pour le moment, conservent encore une apparence un peu empirique. Mais ces remarques sont très simples et peu nombreuses. On peut ainsi déterminer, les dimensions géométriques de l'anneau, le bobinage de l'induit, fixer la valeur de l'entrefer qui séparera l'inducteur de l'induit, et connaître aussi comment devra être constitué l'inducteur.

L'inducteur est fait aujourd'hui avec de l'acier coulé, dont il faut, pour évaluer le flux produit, connaître très bien les propriétés magnétiques ; on a dressé des tableaux d'usage courant qu'utilisent les ingénieurs et qui donnent les forces magnétisantes nécessaires pour déterminer une induction donnée. Ces forces sont heureusement assez faibles grâce à la haute perméabilité de l'acier ; si l'on calcule, comme l'a fait Mordey, la dépense d'excitation correspondant au flux produit dans les diverses parties de la machine, on trouve que l'excitation de l'armature de l'inducteur, qui pourtant

est la seule efficace, ne correspond qu'à 1 pour 100 de la dépense totale ; il y a donc, semble-t-il, encore beaucoup de progrès possibles, mais les améliorations qui pourront être obtenues à cet égard, n'auront que des effets peu marqués sur le rendement total de la machine qui est déjà excellent ; la dépense d'excitation est si petite qu'ici le gaspillage n'a pas grande importance.

Les véritables pertes dans la machine proviennent d'autres causes qu'il n'est peut-être pas inutile de rappeler : résistance de l'air et frottement mécanique, étincelles aux balais, phénomènes d'hystérésis dans l'anneau, courant de Foucault dans les pièces massives de la machine, production d'un flux antagoniste par le courant qui traverse le bobinage de l'induit et dissipation d'énergie par effet Joule dans ce bobinage ; toutes ces causes produisent une diminution de la tension, que l'on appelle souvent réaction d'induit, mais cette diminution n'empêche pas la dynamo de restituer facilement, sous forme électrique, 90 pour 100 au moins de la puissance, mécanique dépensée pour l'actionner.

Pour achever de déterminer les propriétés particulières d'une dynamo, on utilise avec avantage une méthode graphique indiquée, il y a longtemps déjà, par M. Marcel Deprez, mais singulièrement développée depuis. On trace des courbes, dites caractéristiques, qui figurent les conditions variées de fonctionnement d'une machine. Ces caractéristiques peuvent servir, une fois la dynamo construite, pour régler rationnellement son emploi, mais elles fournissent aussi un moyen d'investigation permettant,

à l'avance, de dresser un projet complet où sera prévue la marche dans des circonstances déterminées.

D'une manière générale, de telles courbes représentent les relations qui existent entre l'excitation des inducteurs et la différence de potentiel produite aux bornes ; elles ne sont naturellement pas les mêmes pour les divers modes d'excitation des machines, auxquels correspondent des propriétés très différentes : excitation séparée, employée seulement dans des cas très spéciaux; excitation en série où la totalité du courant, qui passe dans le circuit, passe aussi dans les inducteurs ; excitation en dérivation ou excitation shunt, où les ampères-tours d'excitation ne prélèvent qu'une partie du courant total ; excitation compound, où sont superposés les ampères-tours série et les ampères-tours dérivation, et qui, participant des propriétés des deux précédentes, permet de réaliser des machines où la tension varie peu avec la charge.

Dans ces dernières années, on a souvent tracé des caractéristiques partielles, relatives aux divers éléments, inducteur, entrefer, induit, qui composent le circuit magnétique ; ces courbes sont particulièrement instructives et font comprendre le rôle spécial de chacun de ces éléments ; leur combinaison donne une représentation du fonctionnement de l'ensemble.

On a dit souvent qu'une industrie a pris une forme véritablement scientifique lorsqu'elle est parvenue à fixer un modèle définitif de ses produits; à ce titre,

l'industrie de la production de l'énergie électrique semblait, il y a peu de temps, toucher à la perfection : à la variété infinie des débuts avait succédé une uniformité presque parfaite des types. La dynamo à courant continu semblait s'être définitivement fixée dans la forme multipolaire, à inducteurs fixes, à induit tournant à l'intérieur,

Mais la dynamo ne constitue pas à elle toute seule l'appareil générateur de l'électricité ; elle est forcément associée à un moteur fournissant la puissance mécanique qu'elle transforme en puissance électrique, et les progrès accomplis dans la construction des moteurs peuvent entraîner de grands changements dans la construction électrique ; ces modifications sont d'autant plus profondes que, dans les groupes électrogènes, l'union s'est faite de plus en plus intime entre la machine motrice et la machine électrique, et qu'étroitement solidaires, faits l'un pour l'autre, ces deux organes constituent désormais un ensemble unique.

On doit donc s'attendre à ce que l'apparition de nouveaux moteurs produise une évolution dans la forme des dynamos et l'on ne saurait s'étonner que l'invention des turbines à vapeur soit venue tout modifier à un moment où l'on pensait avoir atteint un régime stable.

Les grandes vitesses des turbines conviennent particulièrement aux alternateurs, ce sont eux qui, surtout, ont ressenti l'influence des progrès qui ont permis aux mécaniciens de réaliser ces moteurs de petit volume, puissants et rapides.

La dynamo à courant continu se prête mal à une

rotation qui exige de si fréquentes commutations, mais les partisans de ce mode de production du courant n'ont pas cependant renoncé à tout espoir de le mettre en harmonie avec les conditions nouvelles ; ils ont repris une idée ancienne, mais qui n'avait guère été appliquée qu'à la construction de très petites machines, et ils ont fait des essais intéressants pour réaliser des dynamos où les inducteurs n'agiraient que par un pôle et où il ne serait plus nécessaire de conserver le collecteur.

§ 2. — LES ALTERNATEURS.

Nous avons vu que le courant alternatif n'était, il y a une quinzaine d'années, employé que très exceptionnellement ; tous les efforts, surtout en France, se concentraient sur les machines à courant continu. Lorsque l'on eut compris que le courant alternatif se prête beaucoup mieux que son rival aux transports à grande distance, parce qu'il est beaucoup plus favorable aux tensions élevées, on s'attacha, au contraire, avec ardeur à perfectionner les appareils générateurs ou récepteurs correspondant à cette modalité d'énergie électrique. Le temps perdu a été vivement regagné ; aujourd'hui, la théorie des appareils alternatifs est solidement assise, les alternateurs ont, eux aussi, atteint le moment où des machines prennent leur forme définitive et leur construction se fait suivant des règles désormais ixées.

Pour obtenir les variations alternatives de flux qui doivent, dans l'induit, donner naissance au courant alternatif, le procédé, qui se présente d'abord à

l'esprit et qui, en fait, est généralement employé, consiste à produire un déplacement relatif de cet induit et de l'appareil qui crée le champ inducteur.

Il n'est pas cependant nécessaire de procéder de cette manière ; si, devant un inducteur fixe, on fait tourner une barre de fer doux, la résistance magnétique varie suivant la valeur plus ou moins grande que prend l'entrefer dans les diverses positions de la barre, et l'on peut arranger les choses de telle façon que le flux, qui affecte alors une forme ondulée, aille traverser un bobinage induit convenablement disposé.

Sur ce principe, on a construit des alternateurs à fer tournant, qui, n'ayant pas d'enroulements mobiles, et ne demandant par suite, ni bagues, ni frotteurs, étaient particulièrement simples et d'une conduite facile, mais la grande vogue dont ils ont joui pendant quelque temps a cessé et ce genre de machines tend de plus en plus à disparaître ; elles étaient trop lourdes pour une puissance déterminée.

On est donc revenu aux alternateurs où l'induit et l'inducteur sont mobiles l'un par rapport à l'autre ; une machine à courant continu, qui n'aurait pas de collecteur, mais qui posséderait de simples bagues, réaliserait le type d'une machine alternative où l'inducteur est fixe et l'induit mobile. Ce dispositif ne convient pas pour les grandes tensions qu'on demande maintenant ; il serait très dangereux pour les ouvriers, très mauvais aussi pour la conservation de la machine, d'avoir, pour capter les courants, des organes mobiles, que l'on ne peut isoler d'une façon certaine ; aussi, dans la presque totalité des alter-

nateurs industriels modernes, la disposition inverse est-elle adoptée ; le système inducteur, qui ne comporte que de basses tensions, est animé d'un mouvement de rotation devant un induit fixe, dont le bobinage aboutit à des bornes également fixes en relation directe avec la distribution.

L'induit, qui le plus souvent se trouve à l'extérieur, est composé de tôles assez fines, isolées entre elles par du papier ou du vernis sur lequel sont disposés soit des barres pleines, soit des câbles formés par un ensemble de fils fins de manière à constituer un enroulement à tambour. Il est nécessaire d'obtenir un excellent isolement et aussi, pour que l'enroulement se puisse soutenir, de disposer le bobinage dans des dents ou même dans des encoches complètement fermées. Le choix du profil de ces dents n'est pas indifférent ; de leur forme dépend la valeur de la self-induction dans l'induit et par conséquent celle du facteur de puissance.

Dans les machines primitives, les pôles inducteurs étaient des aimants permanents, mais aujourd'hui, sauf pour quelques applications particulières où l'on veut produire un courant toujours le même avec une sécurité aussi grande que possible, les alternateurs employés dans l'industrie possèdent comme inducteurs des électro-aimants. L'excitation, qui n'absorbe pas même un vingtième de la puissance, ne saurait plus ici être prise directement ıx bornes de la machine elle-même, puisque cette xcitation demande du continu et que la machine ournit de l'alternatif. Le plus souvent, on s'adresse, our la produire, à une source auxiliaire, à une

petite dynamo à courant continu mue par le moteur même qui commande l'alternateur; parfois, on obtient le courant inducteur, en rédressant, à l'aide d'appareils spéciaux dont il sera question plus loin, une partie du courant alternatif. Les pôles inducteurs, disposés sur la roue qui tourne à l'intérieur de la couronne d'induits, sont généralement assez nombreux, 60, 80 ou 100; il doit en être ainsi pour que l'on puisse produire, avec des marches lentes, les fréquences de 25 ou 50 nécessaires dans la pratique, par exemple pour l'éclairage où des fréquences trop faibles donneraient à la lumière des oscillations fatigantes.

Les alternateurs de puissance moyenne sont encore assez souvent conduits par courroie, mais, pour les génératrices de haute puissance, on tend de plus en plus à supprimer ce gênant intermédiaire, et à faire de l'inducteur le volant même de la machine motrice; le grand moment d'inertie des inducteurs convient fort bien pour cet usage, le clavetage des divers éléments entre eux et sur l'arbre, rappelle entièrement celui des volants ordinaires.

La plupart des transports de puissance mécanique se font à partir d'une chute d'eau et l'on a été ainsi amené à accoupler l'alternateur avec les turbines qu'actionne la pression hydraulique : les turbo-alternateurs avaient déjà habitué les électriciens à de telles associations quand les turbines à vapeur firent leur apparition dans le domaine industriel.

Mais pour qu'il devint possible de constituer, dans les conditions nouvelles, des groupes électrogènes formés par l'union directe de la machine électrique

et des nouveaux moteurs, il était nécessaire de modifier le type de construction de façon qu'il pût s'adapter aux besoins créés par les progrès de la mécanique, et ainsi commença une nouvelle évolution, commandée, elle aussi, par une action de milieu.

Les turbines à vapeur tournent nécessairement très vite, elles font environ 500 à 3.000 tours par minute et cette rapidité oblige à modifier considérablement la constitution de l'inducteur; comme il importe de produire des courants de fréquence usuelle et que la fréquence dépend du nombre de fois où un pôle de l'inducteur passe par unité de temps devant une bobine de l'induit, il faut, puisque la vitesse de rotation est devenue beaucoup plus grande, diminuer le nombre des pôles; on comprend que, dans ces conditions, le turbo-alternateur va se présenter comme une machine moins souple que l'alternateur-volant et que sa construction sera assujettie à des règles plus sévères.

Il n'est pas possible non plus, avec ces grandes vitesses, de conserver le diamètre élevé qu'on était arrivé à donner aux alternateurs-volants de grande vitesse, la force centrifuge prendrait des valeurs exagérées qui compromettraient rapidement la solidité de la machine; aux actions mécaniques s'ajoutent d'ailleurs des attractions magnétiques intenses qui, elles aussi, obligent à rendre l'inducteur et l'induit assez rigides pour qu'ils ne puissent pas se déformer sous l'influence de forces considérables. Heureusement les progrès de la métallurgie ont, dans ces dernières années, marché de pair avec

ceux de l'électrotechnique, et ils ont permis de disposer, au moment même où l'on avait besoin, de matériaux possédant une ténacité telle que l'on pouvait, sans danger, décupler les vitesses qui, il y a quelque vingt ans, auraient déjà passé pour excessives; par exemple, pour maintenir en place les fils conducteurs logés dans les rainures, on a utilisé avec grand profit des frettes construites avec ces aciers au nickel dont nous avons déjà parlé et dont les propriétés ont été si bien étudiées par M. Ch.-Ed. Guillaume.

Pour arrêter définitivement le plan d'un alternateur à construire, ou, s'il est construit, pour déterminer les conditions dans lesquelles il conviendra de le faire fonctionner, on use de procédés analogues à ceux que nous avons vu employer dans le cas des dynamos à courant continu.

Mais, ici, la question est plus complexe, la puissance dépend du courant, de la force électromotrice et du décalage; elle peut, nous le savons, se décomposer en deux : la puissance réelle ou wattée et la puissance déwattée ou magnétisante et, selon les cas, il y a intérêt à modifier le rapport de ces deux termes. D'ailleurs pour définir complètement un alternateur, il ne suffirait pas de donner la tension, le courant et le facteur de puissance; il faut, en réalité, connaître les caractéristiques à vide et en charge. La caractéristique à vide représentera la force électromotrice efficace induite dans l'indu pour chaque intensité du courant inducteur; ell permettra, par exemple, de constater que la m

chine fournira un courant d'autant plus stable que les inducteurs seront plus excités. La caractéristique en charge sera la courbe qui figurera la tension efficace aux bornes en fonction de l'intensité efficace dans le circuit extérieur; elle pourra être extrêmement différente si la machine travaille sur des résistances sans self-induction, ou si, au contraire, le circuit d'utilisation est inductif. On sait aujourd'hui déterminer ces caractéristiques, avant même que la machine soit construite, par diverses méthodes, parmi lesquelles on peut citer celles de MM. Blondel, Picou et Potier.

Le courant fourni par un alternateur n'est jamais, en pratique, le courant sinusoïdal simple, sa forme est souvent très complexe; les appareils dont nous avons parlé, oscillographes ou ondographes, donnent à cet égard les plus précieux renseignements et permettent de déterminer les harmoniques de périodes sous-multiples de la période principale, qui viennent s'ajouter au courant fondamental pour constituer le courant réel.

Ces harmoniques sont dus, soit à la forme des pôles, soit à celle des dentures qui produisent des fluctuations du flux; ils peuvent être, les uns et les autres, extrêmement nuisibles.

Ils donnent, en effet, naissance à des courants parasites qui augmentent les pertes par effet Joule, et, surtout, ils peuvent provoquer dans le circuit d'utilisation une élévation de la tension très dangereuse pour tous les appareils. Nous avons vu en effet que, pour une fréquence convenable, il pourra y avoir un phénomène de résonnance, l'effet de la

capacité annulant celui de la self-induction. Ce phénomène ne se produit jamais avec le courant fondamental, parce que la capacité de la ligne n'est jamais assez grande, mais il n'est pas impossible qu'il apparaisse avec l'un des harmoniques. Une étude soignée de la forme des dents et des pièces polaires s'impose donc, quand on veut diminuer ces fâcheux effets; mais on peut aussi employer des procédés électriques d'amortissement; c'est ce qu'a fait, d'une façon très ingénieuse, M. Maurice Leblanc à l'aide d'un dispositif auquel il donne le nom expressif d'étouffeur d'harmoniques.

Grâce aux indications de la théorie, on parvient ainsi, petit à petit, à diminuer toutes les pertes et le rendement des alternateurs atteint aujourd'hui 95 p. 100; on ne saurait guère exiger davantage, il convient même, en certains cas, de ne pas chercher le mieux, qui reste, en électricité comme ailleurs, l'ennemi du bien: Ainsi les courants de Foucault qui absorbent une partie de la puissance perdue ne sauraient être supprimés sans inconvénient. Par l'effet des forces électromagnétiques qu'ils exercent d'après la loi de Lenz, ils peuvent jouer un rôle très utile en amortissant les oscillations des alternateurs couplés et en diminuant l'influence fâcheuse des harmoniques.

Dans tout ce qui précède, j'ai considéré des alternateurs qui donneraient un courant alternatif ordinaire; mais il n'y a presque rien à ajouter pour traiter le cas des machines qui fournissent des courants polyphasés. Veut-on avoir des courants triphasés, la couronne fixe en fer feuilleté de l'induit

portera trois encoches pour chacun des pôles placés sur la jante de la roue inductrice, et, en utilisant les encoches qui vont de trois en trois, on pourra former trois circuits utilisables séparément, mais que l'on connectera, d'ordinaire, comme il a été expliqué plus haut, en étoile ou en triangle.

Disons, enfin, que les alternateurs dont il a été parlé jusqu'à présent sont ce que l'on appelle des alternateurs synchrones ; il en existe d'autres, les alternateurs asynchrones, qui, en certains cas, peuvent rendre de grands services ; mais il sera plus aisé d'en comprendre le principe lorsque nous aurons étudié la question des moteurs.

§ 3. — COUPLAGE ET COMPOUNDAGE.

Quelque grande que soit la puissance des machines modernes (elle atteint aujourd'hui jusqu'à 8,000 kilowatts), on ne saurait, dans une usine où l'on produit de l'énergie électrique, se contenter d'un seul générateur ; il faut pouvoir se parer contre un accident possible et être en mesure de répondre aux demandes variables de consommation qui se produisent sur le réseau.

On a donc été amené à avoir plusieurs groupes électrogènes pouvant être mis en service suivant les besoins, et l'on s'est trouvé ainsi en présence d'un nouveau problème : la détermination du meilleur mode d'association des dynamos et des précautions nécessaires pour les coupler.

Lorsqu'il s'agit des machines à courant continu, la question est assez simple. Deux cas généraux se

présentent : ou bien l'on veut avoir une distribution à intensité constante, ou bien, au contraire, l'on désire un potentiel invariable.

Dans le premier cas, on emploiera des machines excitées en série ou à excitation indépendante ; ces dernières se comportent absolument comme des piles et leurs modes d'association sont réglés par les principes élémentaires que tout le monde connaît. L'accouplement en dérivation des dynamos excités en série présente quelques difficultés, mais on l'emploie rarement ; on utilise, au contraire, assez fréquemment l'accouplement en série. Chaque génératrice, dont le bobinage inducteur peut être parcouru par le courant total de la distribution, est mise, tout d'abord, en court-circuit par un interrupteur ; pour la mettre en marche, il suffit d'ouvrir cet interrupteur ; l'on règlera ensuite l'excitation à l'aide d'un rhéostat, de manière que tous les générateurs donnent sensiblement le même voltage. Pour enlever une des dynamos, il faudra simplement la remettre en court-circuit ; mais on aura soin, bien entendu, de faire, au préalable, baisser la tension aux bornes en diminuant l'excitation.

Le second cas est peut-être le plus fréquent ; la nécessité d'un voltage constant s'impose pour l'éclairage ; l'accouplement en dérivation ou, comme l'on dit souvent, en parallèle, de machines excitées en dérivation convient alors très bien. Entre deux barres, c'est-à-dire entre deux conducteurs du tableau de distribution, il faut maintenir une différence de potentiel invariable. Supposons que déjà l'installation soit en marche et que l'on veuille

mettre en circuit une nouvelle machine ; on la fera d'abord, avant de la fermer sur le circuit, tourner à vide, de manière à ce qu'elle donne la tension voulue, et l'on mettra alors seulement, et simultanément, ses deux pôles en communication avec les deux barres ; on règlera ensuite toutes les excitations des machines de façon qu'elles prennent toutes sensiblement les mêmes charges. Désire-t-on, au contraire, retirer une machine, on rendra d'abord, en diminuant l'excitation, sa charge à peu près nulle, et l'on ouvrira l'interrupteur ; à ce moment, à cause de la self-induction des inducteurs, il jaillira un arc dû à un courant de rupture intense. On peut éviter cet inconvénient en fermant le circuit inducteur sur de grandes résistances dites résistances de décharge.

Souvent aussi, on accouple des machines à excitation compound ; le couplage en série n'aurait alors aucun intérêt ; mais le couplage en dérivation est fort employé, par exemple pour les usines de tramways. Dans ce couplage, il serait à craindre que la tension donnée par l'une des machines venant à surpasser celle des autres, les pôles de l'excitation en série arrivassent à s'inverser. Pour éviter un tel accident, on doit relier les pôles de même nom de l'excitation par un fil compensateur ; mais pour que la précaution soit efficace, il est nécessaire que la résistance de ce fil soit négligeable par rapport à celle des inducteurs, et il n'est pas toujours facile de satisfaire à cette condition.

Des questions semblables, mais beaucoup plus

délicates, se posent pour les alternateurs ; le couplage en série ne se pratique guère dans ce cas, Hopkinson affirmait même que l'on ne saurait le réaliser complètement. M. Boucherot a cependant indiqué comment, par l'emploi de condensateurs, il était possible d'obtenir une sorte d'association d'alternateurs fonctionnant régulièrement en série, mais, comme il est toujours aisé, ainsi que nous le verrons plus loin, d'élever, au moyen de transformateurs, la tension des courants alternatifs, ce mode de couplage n'a, en pratique, que peu d'intérêt.

Le couplage en parallèle est, au contraire, très usité. Il ne paraît pas, de prime abord, très aisé à réaliser : il faudra non seulement que l'alternateur, que l'on voudra mettre en circuit dans la distribution, fournisse, comme dans le cas des dynamos à courant continu, une tension égale à celle de cette distribution, mais encore que ces deux tensions soient en phase, c'est-à-dire qu'elles soient, à chaque instant égales et de même sens, et, bien entendu, il est nécessaire que toutes les machines accouplées aient exactement la même fréquence. Ainsi, dans une journée où les machines auront produit des courants dont le sens se sera interverti de 3 à 5 millions de fois, on devra obtenir ce résultat prodigieux qu'aucune d'elles n'ait fait, cependant, une période de plus que l'autre.

Heureusement les propriétés mêmes des courants alternatifs permettent de trouver une solution que les moyens mécaniques seraient sans doute impuissants à fournir. Deux alternateurs couplés électri-

quement se comportent comme deux machines reliées par un accouplement élastique ; si l'une d'elles, par exemple, commence à prendre de l'avance sur l'autre, il faut qu'elle fournisse une puissance plus grande et cette élévation va, à son tour, produire un ralentissement ; des courants, dits courants de compensation ou de circulation, prennent naissance qui tendent à ramener l'alternateur capricieux en coïncidence de phase avec le réseau.

Mais ce retour à l'équilibre ne s'accomplira pas instantanément, tel un corps qui écarté de sa position d'équilibre stable n'y revient qu'en effectuant une série d'oscillations, l'alternateur, couplé sur un réseau, constitue un système en équilibre stable qui possède la propriété d'osciller et, ces oscillations sont fort nuisibles, elles se traduisent, par exemple, dans les appareils d'éclairage par les variations d'intensité désagréables que connaissent les abonnés des secteurs à courant alternatif et qui se remarquent quand le couplage n'a pas bien réussi. On a cherché à les amortir le plus rapidement possible, M. Leblanc obtient à cet égard d'excellents résultats, grâce à un procédé qui rappelle celui que l'on a employé pour amortir le mouvement de l'appareil mobile des galvanomètres.

Si les oscillations n'étaient pas supprimées rapidement, l'on devrait craindre les plus graves accidents parce que, comme dans tous les systèmes scillants, il se pourrait produire des phénomènes e résonnance qui augmenteraient l'écart dans une ;rande proportion et mettraient l'alternateur hors le phase. On dit que l'alternateur est alors décroché,

et tout le réseau peut se trouver ainsi mis en court-circuit. A ce moment les perturbations deviennent vraiment redoutables, la lumière s'éteint brusquement et toutes les machines de l'usine travaillant à faux peuvent subir des détérioriations ruineuses et dangereuses pour le personnel.

La question de la stabilité du couplage a donc une importance de premier ordre et l'on comprend aisément qu'elle ait été, dans ces dernières années, l'une des principales préoccupations des électriciens. Elle a fait l'objet de très beaux travaux, parmi lesquels on peut mentionner particulièrement ceux de MM. Leblanc, Boucherot, Blondel, etc.

On est, ici encore, sur un terrain où se rencontrent le savant et l'ingénieur; leur accord est nécessaire pour élucider un sujet qui touche à la mécanique et à l'électricité théorique et qui se rattache, d'autre part, à la technique des moteurs et à la pratique des machines électriques. En examinant le problème, on arrive à distinguer qu'il y a trois genres d'oscillations possibles, et l'on conçoit qu'il n'est pas facile de les éviter en même temps. Sans entrer ici dans des détails de calcul, on peut, au moins, donner cette conclusion générale que, pour maintenir rigoureusement l'isochronisme des alternateurs, il conviendra de ne pas tous les munir de régulateurs de vitesse trop sensibles qui empêcheraient les actions électriques d'opérer, en toute liberté, pour produire leur effet bienfaisant d'amortissement automatique; ainsi, dans le cas des machines à vapeur, il sera préférable de n'avoir qu'un régulateur unique sur la conduite d'alimentation générale.

Dans les machines montées en parallèle, la concordance se maintient donc grâce aux réactions électriques, et l'on parvient aujourd'hui à empêcher les accidents qui la pourraient déranger; mais encore faut-il que, si l'on veut associer deux machines, on n'établisse, au début, la communication qu'au moment favorable où elles sont exactement en phase. On se servira, à cet effet, d'appareils spéciaux qu'on appelle des indicateurs de phase; pour constater, par exemple, que deux machines de puissance égale ont bien, à un moment donné, des potentiels égaux et de même signe à l'un de leurs pôles, il suffirait de joindre ces pôles par un fil sur lequel on intercalerait des lampes convenables; quand les deux machines seront en opposition, les lampes s'éteindront complètement, et, à ce moment précis, l'on pourra effectuer le couplage.

Il ne suffit pas, dans une distribution, que toutes les machines marchent parfaitement d'accord à chaque instant, il faut encore que, malgré tous les incidents qui se produisent dans le réseau, elles fournissent constamment à ce réseau, dans le cas le plus usuel, une différence de potentiel constante. Nous avons vu que, pour les dynamos à courant continu, on pouvait assurer la constance en agissant sur l'excitation. Avec le mode d'excitation compound, la régularité peut même s'obtenir automaquement, et, dès 1881, M. Marcel Desprez a proposé ne solution très satisfaisante.

Dans le cas des alternateurs, la question est sinulièrement plus complexe ; la tension à régler est

alternative, tandis que l'excitation est continue et le compoundage ne saurait, par suite, s'obtenir sans des organes intermédiaires. Pour le réaliser, il faut d'ailleurs bien connaître les causes qui font varier la tension ; elles sont de deux sortes : celles qui agissent pour changer le débit et celles qui provoquent des altérations dans la valeur de la vitesse.

Diverses méthodes ont été proposées ; l'une des plus répandues, qui est une méthode purement électrique, est celle de M. Boucherot. Elle consiste essentiellement à exciter l'inducteur par un courant continu, produit par une dynamo de forme très particulière. L'induit, qui porte un enroulement convenablement disposé, est mis en rotation par un champ tournant ; ce champ est dû à des bobines qui sont parcourues par des courants induits eux-mêmes par le courant de l'alternateur. Cette description sommaire est certainement insuffisante pour faire comprendre le système, mais elle permettra, du moins, de deviner l'ingéniosité que l'auteur de l'invention a dû dépenser pour établir la solution d'un problème aussi complexe. D'autres procédés, dus à M. Blondel, à M. Leblanc, ont donné également de bons résultats ; on a aussi essayé des compoundages électromécaniques, où l'on cherche à faire agir des régulateurs de vitesse pour modifier l'excitation.

L'intérêt de ces dispositifs est très grand, non seulement parce qu'il est très important de parer immédiatement aux baisses de tension qui pourraient amener des fluctuations énormes dans l'intensité lumineuse des lampes d'un réseau, ou une

insuffisance de puissance dans les moteurs actionnés par une distribution, mais encore parce que la réalisation d'un bon compoundage peut amener une très notable économie dans la construction des alternateurs. On ne parvient, en effet, à diminuer la dépense de matière qu'en adoptant des dispositions qui augmentent la réaction de l'induit et, par suite, aussi l'écart entre les tensions correspondant à des charges différentes. Il est donc de toute nécessité, pour les alternateurs puissants, de posséder des moyens très efficaces de régulation, si l'on ne veut pas être amené à des constructions par trop dispendieuses. La Science, descendant de son domaine de pur désintéressement, est seule capable de fournir ici à l'industriel les règles qu'il doit suivre pour travailler dans des conditions économiques.

§ 4. — L'USINE ÉLECTRIQUE MODERNE

Bien jeune encore, l'industrie électrique a subi cependant une évolution déjà très sensible; dans ses débuts timides, elle produisait des quantités d'énergie relativement minimes, consommées dans un rayon peu étendu autour de l'usine génératrice, et, au fur et à mesure qu'elle progressa, on vit tout d'abord croître très rapidement le nombre des stations de moyenne importance où se produisait la puissance électrique, distribuée à des abonnés peu ombreux ou utilisée pour la traction sur des lignes estreintes. Ainsi, il y a quelque vingt ans, pour éclairer une simple avenue, comme l'avenue de

l'Opéra, à Paris, on avait cru nécessaire d'installer trois stations : l'une place de l'Opéra, l'autre rue d'Argenteuil, la troisième voisine de la place de l'Opéra.

Mais l'industrie électrique n'échappa pas longtemps à la loi générale, qui veut que la production en gros soit toujours plus avantageuse que la production en détail, et elle dût, pour vivre et prospérer, concentrer ses efforts. Il apparut clairement que les grands aussi bien que les petits industriels ont intérêt à emprunter l'énergie, dont ils ont besoin, à une usine centrale de très grande puissance. Les frais de premier établissement résultant de l'acquisition des moteurs et des dynamos, de la construction du tableau de distribution et des bâtiments, aussi bien que les dépenses d'exploitation, comprenant le salaire des ouvriers, le prix du charbon, de l'entretien et de la réparation des machines, varient beaucoup suivant les unités que l'on utilise ; on a calculé, par exemple, que, pour une usine de tramways, le prix de revient du kilowatt-heure à l'usine changeait du simple au double suivant qu'on emploie des unités de 1,000 ou de 200 chevaux.

La station centrale de grande puissance est donc devenue une nécessité économique et le besoin a fait naître, dans ces dernières années, autour de de toutes les grandes villes, en Europe et en Amérique, de grandioses installations.

Ces centrales doivent s'élever sur des emplacements convenablement choisis pour qu'elles puissent recevoir facilement et à peu de frais les quantités énormes de combustible qu'elles consomment

et aussi pour qu'elles trouvent abondamment l'eau nécessaire à l'alimentation des chaudières et des condenseurs. Les usines nouvelles de la région parisienne, celles d'Anvers, de New-York, de Philadelphie ont, pour ces raisons, été construites au voisinage d'un cours d'eau.

Dans les installations mues par la vapeur, on utilise encore très souvent des machines à piston mais, bien entendu, ces machines sont à multiples expansions et, en général, compound, c'est-à-dire à plusieurs cylindres. Le plus souvent, elles appartiennent au type horizontal tandem qui se prête à une surveillance facile et à un entretien commode. La règle n'est cependant pas générale : Ainsi l'usine du Métropolitain de Paris, au quai de la Rapée, possède des groupes compound verticaux et les centrales de New-York ont des machines colossales à deux cylindres, l'un, le cylindre à haute pression horizontal, l'autre, celui à basse pression, vertical, qui attaquent tous deux la même manivelle.

Mais ces énormes machines ont le grave inconvénient d'avoir des organes qui se développent sur plusieurs étages ; encombrantes, pesantes, bruyantes et dangereuses, elles commencent, en plusieurs endroits, à être remplacées par les turbines qui, grâce à leur grande vitesse de rotation, sont, à puissance égale, singulièrement plus légères et plus ramassées ; ainsi, à la belle usine de Saint-Denis, les turbines ont $3^{m}50$ de haut sur 14 mètres de long et 4 mètres de large, tandis qu'une machine à piston équivalente devrait occuper le cube d'une maison à trois étages ; le groupe électrogène à turbine pèse

d'ailleurs vingt fois moins qu'un groupe de même puissance constitué avec l'ancien moteur.

On rencontre actuellement, dans les centrales, des turbines de deux types différents : les turbines horizontales, telles que les turbines Parsons utilisées à l'usine de Saint-Denis et les turbines verticales, telles que les turbines Curtis employées surtout en Amérique ; celles-ci sont mieux équilibrées, mais elles ont l'inconvénient de faire porter tout le poids du groupe électrogène sur un axe unique, et aussi d'exposer l'alternateur, placé directement au-dessus de l'appareil à vapeur, à une fâcheuse élévation de température.

Signalons enfin le très intéressant usage que l'on peut faire des turbines Rateau pour ne pas laisser se perdre inutilement l'énergie que contiennent encore les vapeurs qui s'échappent des machines à vapeur ordinaire sans condensation. Ainsi, aux mines de Bruay, deux puissantes dynamos à courant continu fonctionnent gratuitement, en récupérant le travail qui, pour ainsi dire, s'en allait auparavant en fumée librement dans l'air.

La vapeur reste donc, dans les centrales électriques, la principale source d'énergie mécanique ; elle n'a pas été chassée du premier rang par le redoutable courant qui a triomphé sur d'autres terrains : le moteur à explosion. Mais elle a été menacée par un autre rival, le moteur à gaz pauvre et l'on trouve dans certaines régions métallurgiques, des groupes électrogènes de 6,000 chevaux, actionnés par les gaz que fournissent les hauts fourneaux voisins ; mais le moteur à gaz pauvre est certainement

plus quinteux et moins souple que le moteur à vapeur.

Tous ces puissants moteurs actionnent aujourd'hui des machines génératrices également très puissantes. Les mêmes raisons d'économie et de meilleur rendement qui ont centralisé dans des usines, opérant en grand, la production d'énormes quantités d'énergie électrique, ont, dans ces usines même, conduit à n'employer qu'un très petit nombre de très grosses unités. Et l'on a su, dans ces dernières années, construire des machines capables de fournir, en un temps donné, un travail de plus en plus considérable. A l'exposition de 1889 on considérait avec admiration une dynamo de 250 kilowatts[1], à celle de 1900 on trouvait prodigieux un alternateur de 3,000 kilowatts. Aujourd'hui on est arrivé à des unités de 8,000 kilowatts, capables, par conséquent de produire chacune une quantité d'énergie électrique comparable à celle que les sept secteurs de Paris réunis vendent à la totalité de leurs clients.

Il ne paraît pas nécessaire pour le moment de dépasser de beaucoup une telle puissance, on ne saurait, dans une usine centrale, pousser les choses à l'extrême et il serait imprudent de n'avoir qu'un seul groupe électrogène d'où dépendrait l'alimentation de toute une ville.

Les besoins d'énergie croissent d'ailleurs très

1. Rappelons que 1 watt vaut 0 kgr. 102 par seconde, et que 1 kilowatt vaut 1.000 fois plus; un cheval-vapeur vaut 75 kilogrammètres par seconde ou 0,736 kilowatts.

Le kilowatt-heure, travail de 1 kilowatt pendant une heure, vaut 367.200 kilogrammètres, tandis que le cheval-heure, travail de 1 cheval pendant une heure, vaut 270.000 kilogrammètres.

rapidement ; les tramways, le métropolitain, les chemins de fer de pénétration, les voitures à accumulateurs, les diverses industries où la force motrice peut être empruntée à une distribution électrique, ont des exigences de plus en plus grandes et, sans trop d'exagération, l'on évalue à 700 millions de kilowatts-heure la quantité d'énergie électrique que pourra, d'ici peu, consommer annuellement la région parisienne. Deux ou trois usines comme l'usine de Saint-Denis, suffiraient à un si formidable débit et l'on sent profondément les changements considérables qu'apporte l'électricité aux conditions du travail industriel, quand on voit toute cette puissance développée par les soins d'un personnel très restreint ; à Saint-Denis, soixante-dix personnes, équipes de jour et de nuit comprises, assurent le service complet.

Ce résultat merveilleux est obtenu grâce à la façon automatique dont l'usine fonctionne, particulièrement pour l'alimentation en combustible : le charbon, pris sur la Seine dans les chalands par une grue électrique, est porté par les godets d'un chemin roulant dans d'énormes soutes d'où il s'écoule d'une façon régulière sur le foyer de 60 chaudières de 420 mètres carrés de surface de chauffe, les cendres et machefers sont de même évacués automatiquement. L'ouvrier ici commande, surveille, et n'a plus aucun rôle servile.

Dans ces grandes stations, l'organe le plus délicat est peut-être le tableau de distribution qui recueille et contrôle le courant produit par les génératrices et qui l'envoie dans les circuits d'utilisation. Ces tableaux se présentent aujourd'hui d'une façon agréa-

ble avec leurs barres de cuivre nu posées sur de grandes tables de marbre; ils sont aérés, c'est-à-dire que les divers appareils qu'ils portent ont le plus de place possible et beaucoup de jour.

Aussi les tableaux modernes ont souvent plusieurs étages; en haut, les instruments de mesure, que l'on veut maintenant précis, étalonnés soigneusement, vérifiés par exemple par le Laboratoire de la Société Internationale des Électriciens; sur cet étage, où se tient, comme un capitaine sur le pont du navire, l'ingénieur qui commande tous ces tramways, toutes ces usines, toutes ces machines qui empruntent la force et la lumière à l'usine centrale, ne se trouve généralement que le courant à basse tension de façon que le personnel, et aussi les instruments délicats, soient bien mis à l'abri de décharges dangereuses. Au-dessous, on dispose les transformateurs nécessaires pour les appareils de transformation du tableau; au-dessous encore, les interrupteurs qui sont eux-mêmes commandés à distance de façon à éviter les accidents; au-dessous enfin, à l'étage inférieur, les câbles qui viennent des génétrices et ceux qui vont aux feeders de distribution.

Nous n'avons parlé jusqu'ici que des usines mues par la vapeur, ou par le gaz, mais, parallèlement, les installations hydroélectriques se développent chaque jour. Dès à présent, la puissance hydraulique utilisée en France par l'intermédiaire de l'énergie électrique dépasse plus de 500.000 chevaux et d'énormes réserves subsistent; ainsi M. l'Ingénieur Tavernier évalue à 4 millions de chevaux la richesse hydrau-

lique contenue uniquement dans la région des Alpes françaises et véritablement utilisable ; cette statistique néglige même toutes les forces hydrauliques inférieures à 200 chevaux dont l'emploi ne serait pas rémunérateur. Le Rhône et l'Arve réunis, avec un aménagement assez facile, pourraient donner, entre la frontière suisse et Pyrimont, une puissance brute et continue de 80.000 chevaux. On sait quelle influence a déjà exercé sur l'industrie et sur la vie sociale l'exploitation de ces nouvelles sources de richesse et nous avons dit les espérances que l'on peut concevoir pour l'avenir.

Pour mettre en œuvre ces énergies et actionner des dynamos, on se sert de turbines hydrauliques qui, à charge constante, avec leur régularité parfaite, conviennent admirablement pour la production de l'énergie électrique ; à charge variable, ces moteurs exigent, à cause de la masse d'eau dont il faut faire varier le mouvement, des appareils régulateurs qui n'ont pas été immédiatement mis au point, mais, aujourd'hui, les régulateurs automatiques ont été amenés à un haut degré de perfection et donnent entière satisfaction.

Dès que les hauteurs de chute atteignent environ 5 mètres, on remplace les anciennes turbines à axe vertical par des turbines à axe horizontal qui n'exigent pas, ou un renvoi de mouvement toujours incommode et fragile, ou l'emploi de génératrices électriques à axe vertical dont la disposition n'est pas favorable.

Deux cas peuvent se présenter en pratique : ou bien il s'agit d'utiliser des basses chutes à grand

débit, ou bien, au contraire, on dispose de hautes chutes à faible débit. Aux basses chutes correspondront, en général, des appareils à marche lente, tandis que les hautes s'accommoderont plus aisément d'alternateurs à grande vitesse à induit tournant.

Comme pour les stations centrales à vapeur, les conditions économiques sont bien meilleures pour les usines hydrauliques puissantes que pour les petites unités ; en France, on a projeté de construire sur les bords du Rhône une usine qui suffirait presque à alimenter Paris ; en Amérique, on a réalisé l'installation hydraulique la plus grandiose qui existe à l'heure actuelle, en utilisant une portion des 75.000 chevaux que pourraient fournir les chutes du Niagara.

CHAPITRE V

Les Moteurs.

---

§ 1. — LES MOTEURS A COURANT CONTINU.

La plus importante, au point de vue pratique et peut-être aussi au point de vue théorique, des diverses formes sous lesquelles peut être utilisée l'énergie électrique est l'énergie mécanique. Les applications que l'homme a, de tout temps, fait du travail mécanique sont les plus nécessaires à la vie industrielle aussi bien qu'à la vie sociale, et, d'autre part, la forme mécanique nous apparait comme l'une des plus nobles et des plus élevées que puisse prendre l'énergie.

L'électricité n'a conquis véritablement le rang qu'elle occupe dans la grande industrie que le jour où le moteur électrique est devenu un appareil, souple, pratique, restituant sur son arbre, en puissance mécanique, presque toute la puissance qu'il reçoit lorsqu'il absorbe un certain courant sous un certain nombre de volts.

Il y a fort longtemps déjà, vers 1838, un physicien

russe, Jacobi, eut le premier l'idée de construire une machine où l'on utiliserait l'électro-aimant pour produire directement des mouvements continus de rotation. On conçoit aisément que si l'on place, sur une roue mobile autour d'un axe horizontal, une série de barres de fer doux équidistantes et disposées sur le contour de la roue parallèlement à l'axe, chacune de ces barres sera soumise à une attraction produisant le même effort qu'un bras qui ferait mouvoir l'anneau mobile si l'on a installé, de la même manière, à l'extérieur et très près du contour, autant d'électro-aimants qu'il y a de barres. Lorsque les barres seront arrivées en face des électro-aimants, elles dépasseront cette position en vertu de la vitesse acquise et si l'on a soin, à ce moment, d'interrompre le courant pour ne le rétablir que lorsque les barres seront parvenues près des électro-aimants suivants, on obtiendra un mouvement constamment entretenu dans le même sens. Il est possible de remplacer les armatures de fer doux par des électro-aimants disposés de manière à présenter des pôles de noms contraires à ceux des électro-aimants fixes, mais il convient alors, pour communiquer à la roue une rotation continue, de changer, à l'aide d'un commutateur convenable, le sens du courant à chaque position d'équilibre.

Dans ces deux systèmes primitifs, on peut reconnaître les ancêtres déjà lointains de quelques-uns de nos moteurs actuels, mais on comprend sans peine que le rendement détestable et la très médiocre puissance ne permettaient guère des applications importantes ; d'ailleurs, à l'époque où furent inventés

ces appareils rudimentaires, l'énergie électrique nécessaire pour les actionner ne s'obtenait qu'à l'aide de piles coûteuses et encombrantes.

La première machine qui fonctionna, et qui fut construite par les soins de Jacobi, atteignait à peu près la puissance d'un cheval ; elle fut employée à mettre en mouvement la roue à palette d'un petit bateau qui, malgré la violence d'un vent contraire, remonta, en présence d'un public nombreux et émerveillé, la Néva à Saint-Pétersbourg.

Il ne faudrait pas croire que cette expérience, un peu oubliée aujourd'hui, passa inaperçue ; elle excita, au contraire, vivement l'attention des industriels en Europe et en Amérique, et l'on conçut même, au début, de grandes espérances qui reposaient sur des idées inexactes.

On avait remarqué qu'avec une pile donnée on parvenait à obtenir des électro-aimants de plus en plus puissants en augmentant le nombre de spires enroulées sur la masse de fer, et l'on s'imaginait que, sans augmenter la dépense, on pourrait créer des effets mécaniques constamment croissants ; d'autre part la théorie de la pile était mal connue, l'on pensait que les réactions chimiques produisent des quantités, pour ainsi dire indéfinies, d'électricité, et, l'on ne comprenait pas parfaitement que ces quantités, ne pouvant se libérer instantanément à cause de la résistance des circuits et ne tombant que d'une faible différence de potentiel, correspondent, en réalité, à des puissances assez limitées.

Les physiciens calmèrent un enthousiasme qui

leur parut, à juste titre, partir d'une conception erronée des phénomènes et, si l'on peut aujourd'hui trouver qu'ils généralisèrent un peu hâtivement et qu'ils furent mauvais prophètes quand ils écrivirent, comme fit par exemple l'un des plus savants d'entre eux, l'illustre Verdet: « qu'il y a peu de chose à espérer de l'avenir des machines électromotrices », il convient de ne pas oublier que, dans l'espèce, leurs réserves étaient néanmoins très sages, leurs critiques très exactes, et l'on doit reconnaître qu'en établissant les raisons scientifiques qui permettaient de démontrer combien un moteur, tel que celui de Jacobi, était dispendieux, ils déblayaient, par là même, le terrain sur lequel, beaucoup plus tard, on devait fonder les principes qui ont conduit à la construction de tant de moteurs excellents.

Le premier point sur lequel ils attirèrent l'attention est le rôle des phénomènes d'induction dans un moteur électrique ; dès que l'appareil tourne, et qu'entrent en jeu les actions électromagnétiques, en vertu de la réciprocité que nous avons indiquée précédemment, une force électromotrice induite prend naissance qui s'oppose au passage du courant ; et ainsi de l'énergie électrique disparaît dont on retrouve l'équivalent dans le travail recueilli ; pas plus qu'aucune autre machine, le moteur ne crée de l'énergie, il consomme, sous forme électrique, ce qu'il restitue sous forme mécanique.

Si le courant est, comme dans les expériences de Jacobi, produit par des piles, c'est, en définitive, l'énergie chimique qui est la source du travail récupéré et les expériences classiques de Favre mon-

trèrent combien, avec les anciens moteurs, cette énergie était mal employée, puisque l'on ne retrouvait comme énergie mécanique qu'un soixante-dixième environ de la chaleur fournie par la dissolution du zinc des piles, chaleur qui peut servir de mesure à l'énergie chimique dépensée.

Aussi les applications des premiers moteurs furent-elles très limitées et très particulières ; ils servirent dans des cas qui n'exigeaient pas de grandes forces motrices mais qui nécessitaient de la précision, de la rapidité et de la facilité, soit pour la mise en train du mouvement, soit pour son arrêt. Un artiste, qui a construit des appareils de mesure remarquables par leur fini, Froment, est peut-être le premier industriel qui ait employé des machines électromagnétiques dans ses ateliers, il les appliquait, avec succès, à mouvoir et à diriger des mécanismes propres à graduer les cercles et, à diviser les règles.

Mais le moteur véritablement utilisable pour les usages les plus variés ne fut découvert que le jour où Gramme inventa la dynamo ; cet admirable appareil de transformation fonctionnait aussi bien comme moteur que comme générateur ; à volonté, il fournissait de l'énergie électrique en absorbant du travail mécanique, ou, inversement, il absorbait la première en régénérant le second. Dès 1873, H. Fontaine avait installé à l'exposition de Vienne un groupe de deux machines Gramme, réunies par ur circuit conducteur, l'une fonctionnait comme géné ratrice, et produisait le courant qui faisait tourne l'autre ; cette expérience renfermait en germe tout

l'abondante récolte qui, depuis lors, a poussé dans le domaine de l'électricité.

La théorie de la dynamo, fonctionnant comme réceptrice, est absolument parallèle à la théorie de la génératrice; dès que la machine est en marche, une force contre-électromotrice, qui a pour mesure, en volts, le nombre qui exprime, en joules, l'énergie mécanique produite dans le récepteur, par le passage d'un coulomb, prend naissance dans l'induit qui tourne; le courant qui circule dans le moteur obéit naturellement encore à la loi d'Ohm et il est égal au quotient, par la résistance de l'induit, de l'excès de la différence de potentiel d'alimentation sur la force contre-électromotrice.

Il est d'ailleurs facile de trouver une expression de la force contre-électromotrice en fonction des données de la machine; on démontre bien simplement que cette expression est exactement la même que celle qui lie, au flux inducteur, au nombre de spires de l'induit et à sa vitesse, la force électromotrice de la même machine, considérée comme générateur.

Des lois de l'induction découle aussi la règle qui permet de connaître le sens de rotation du moteur; d'après la loi de Lenz, la machine, fonctionnant comme réceptrice, tournera dans le sens contraire à celui dans lequel il faudrait la mettre en mouvement, comme génératrice, pour qu'elle produise le courant qui la traverse; ceci, bien entendu, à condition que les pôles inducteurs ne soient pas changés.

De cette règle, on tire facilement des conséquences

relatives aux divers cas possibles ; dans les machines à excitation séparée, rarement employées d'ailleurs, ou dans les machines à aimants permanents, quelquefois encore utilisées pour de petites applications, la rotation est possible dans les deux sens, et dépend du sens du courant.

Dans les machines à excitation en série, et dans les machines dont les inducteurs sont excités en dérivation, il faudra aussi, pour changer le sens de la rotation, changer le sens du courant soit dans l'induit seul, soit dans l'inducteur. Il sera toujours préférable, d'ailleurs, de le changer dans l'induit, soit pour ne pas couper le circuit inducteur, opération dangereuse dans le cas des moteurs en série, soit pour éviter les courants de rupture, généralement plus forts pour les bobines inductrices que pour l'induit.

En principe, les dynamos à courant continu, appartenant à tous les types, peuvent donc être employées comme moteurs et elles permettront de marcher en avant ou en arrière, il ne faudrait pas croire cependant qu'il est indifférent d'utiliser n'importe quelle machine pour tous les cas.

Selon les modes d'excitation, les propriétés peuvent être très différentes.

Le moteur série a un couple de démarrage qui, étant proportionnel au flux et à l'intensité, est très considérable, et une vitesse qui varie en sens inverse du couple résistant ; ce moteur convient donc parfaitement pour des manœuvres intermittentes qui demandent des efforts variables, il sera avantageusement utilisé sur les tramways et pour actionner les

divers engins de manutention, mais lorsqu'il importera d'avoir une vitesse constante avec un couple résistant variable, comme dans les transmissions d'ateliers et d'usines, il ne devra jamais être employé.

Dans ce cas, au contraire, on pourra s'adresser aux moteurs shunt ou moteurs en dérivation qui ont un couple moins élevé au démarrage, mais, dont, en revanche, la vitesse varie peu avec la charge. Les moteurs à excitation mixte ou moteurs compound, qui possèdent les deux modes d'excitation, participeront aux avantages de l'un et de l'autre système et aussi à leurs inconvénients, ils rendront des services quand il s'agira d'exercer des efforts fréquemment variables et qu'une certaine variation de la vitesse avec la charge sera indifférente.

La conduite et la mise en marche des moteurs à courant continu demandent certaines précautions; quand le moteur est au repos il ne donne naissance à aucune force contre-électromotrice, et, si on l'introduit brutalement dans le circuit d'alimentation, son induit, dont la résistance est toujours très faible, va être parcouru par un courant énorme. D'après la loi de Joule, un dégagement de chaleur se produira qui pourra détériorer gravement l'appareil. Il est donc, de toute nécessité, d'intercaler en série avec l'induit une résistance assez grande que l'on pourra ensuite diminuer au fur et à mesure qu'avec la vitesse croîtra la force contre-électromotrice. Ces *rhéostats de démarrage* sont ou bien des rhéostats à liquide ou bien des rhéostats métalliques avec soufflage magnétique destiné à chasser les arcs de rupture qui se produisent aux touches de contact.

Ces mêmes rhéostats peuvent être utilisés pour régler la vitesse, mais ils consomment en pure perte une partie assez considérable de la puissance; aussi préfère-t-on souvent agir sur le flux inducteur, par exemple en augmentant ou en diminuant l'entrefer, ou bien mettre le moteur en communication avec la distribution par l'intermédiaire de divers appareils de transformation. On peut encore disposer sur l'induit plusieurs circuits dont les spires sont en nombres différents, ainsi, dans certaines automobiles électriques on actionne souvent par des accumulateurs un intéressant moteur, familièrement et pittoresquement nommé moteur « 5 et 3 font 8 » parce qu'il comprend deux circuits, dont l'un a 5 spires et l'autre 3; on réalise ainsi des vitesses proportionnelles à 2, 3, 5 et 8, en utilisant, soit un seul de ces circuits, soit tous les deux associés en série, ou d'une façon différentielle.

Lorsque l'on voudra enfin faire cesser l'action du moteur, il faudra, comme au début, ne pas opérer brutalement; si l'on coupait l'excitation pendant qu'il y a encore un courant dans l'induit, le moteur s'emballerait et, d'autre part, le courant acquerrait une intensité dangereuse; on doit avoir toujours soin de supprimer d'abord le courant dans l'induit.

Si l'on coupe ainsi la communication entre l'induit et le réseau et que l'on réunisse les balais par une résistance, la machine va fonctionner comme génératrice, et l'énergie électrique qu'elle produira absorbera la force vive des organes mécaniques qui sont en relation avec le moteur. Il résultera de là un *freinage* très puissant, parfois même un peu

brutal, mais qui sera très utile pour arrêter la charge à un endroit déterminé, et cette propriété a reçu des applications très intéressantes ; elle est employée pour pointer les canons à tourelles ou pour briser l'élan des tramways et diminuer leur vitesse dans les descentes.

Si l'on compare, en appliquant la règle donnée plus haut, le sens de rotation d'une machine fonctionnant comme moteur à celui de la même machine employée comme générateur, on remarquera facilement que, pour freiner, dans le cas d'un moteur série, il faudra intervertir les connexions des inducteurs avec les balais, sinon la machine ne s'amorcerait pas. Dans le cas du moteur en dérivation, la seule précaution à prendre sera de maintenir le circuit d'excitation connecté avec le circuit d'alimentation.

Les moteurs à courant continu sont donc des appareils simples, d'une théorie très claire, d'une pratique facile ; mais ils partagent les défauts des dynamos génératrices ; ils ont souvent une commutation défectueuse, et la présence des balais est une cause de fragilité et de gêne. Au courant alternatif vont correspondre d'autres moteurs qui pourront ne pas présenter les mêmes inconvénients, mais dont la réalisation est souvent plus compliquée et l'étude singulièrement plus délicate et plus laborieuse.

§ 2. — LES MOTEURS SYNCHRONES

La variété des combinaisons auxquelles se prêtent les courants alternatifs simples ou polyphasés

est naturellement plus grande que pour le courant continu ; deux facteurs, voltage et débit, ne suffisent plus pour déterminer complètement le courant, et le constructeur va pouvoir disposer, à son gré, de plusieurs variables.

On comprend, dès lors, qu'à partir du moment où l'alternatif fut mieux connu et où prit fin l'injuste défaveur dans laquelle il était tombé, les solutions proposées pour le faire servir à la production du travail mécanique se multiplièrent rapidement.

Aujourd'hui, les types de moteurs à courant alternatif sont fort nombreux et fort divers, et pour se reconnaître dans une collection devenue presque trop abondante, il est nécessaire d'adopter une classification. Mais, comme dans toutes les entreprises semblables, les auteurs ne sont pas entièrement d'accord sur la meilleure méthode à suivre pour ranger leurs richesses. Il est cependant rationnel de fonder la classification sur les caractères qui paraissent les plus importants, et sans doute ces caractères sont, d'une part, la nature du champ des moteurs, d'autre part le degré plus ou moins élevé de liberté qu'ils possèdent relativement à leur vitesse.

A ce dernier point de vue, où nous nous placerons tout d'abord, les moteurs à courant alternatif se rangent dans deux grandes classes : les moteurs synchrones et les moteurs asynchrones.

Pour les premiers, le nombre de tours qui peut être effectué, dans un temps donné, par la partie mobile, est lié obligatoirement et d'une façon invariable à la fréquence du courant alternatif qui les

alimente ; leur vitesse est, par exemple, rigoureusement la même que celle du générateur, quelle que soit la puissance qu'on leur demande, pourvu, bien entendu, que cette puissance soit inférieure à une certaine limite, au delà de laquelle ils ne pourraient plus tourner ; pour cette raison, on les appelle synchrones, entendant par là qu'ils mettent le même temps que l'appareil producteur du courant pour faire un tour complet. Les seconds ont, au contraire, une vitesse de rotation variable et qui n'a, par conséquent, aucune relation nécessaire avec la fréquence du courant donné ; on dit qu'ils sont asynchrones.

Depuis longtemps déjà, on a utilisé des appareils synchrones à courant alternatif, non pas, sans doute, pour transmettre de grandes puissances, mais pour obtenir cependant des effets bien remarquables et fort précieux. Lorsque, dans les câbles sous-marins, on produisait des émissions d'électricité, tantôt positives, tantôt négatives, et que, dans un galvanomètre à miroir convenablement amorti, puis, plus tard, dans le très ingénieux instrument inscripteur inventé par Lord Kelvin et auquel on a donné le nom de siphon-recorder, on observait des mouvements très brusques et très nets, correspondant au sens des courants qui leur donnaient naissance, on avait, en vérité, réalisé une transmission synchrone d'une petite quantité d'énergie mécanique. L'on trouve également dans un autre appareil bien justement célèbre, un modèle très remarquable d'alternateur et de récepteur synchrones ; je

veux parler du téléphone de Bell, où le synchronisme est précisément la condition même de la fidélité dans la reproduction de la parole. La petite plaque de fer doux, devant laquelle on parle, et la bobine qui entoure l'extrémité du barreau aimanté placé derrière la plaque, constituent un système qui est un véritable alternateur actionné par le mouvement vibratoire du son; tout mouvement de la plaque, modifiant l'aimantation du barreau, fait varier le flux qui traverse la bobine, et de cette variation résultent des courants alternatifs. Ces courants vont actionner un appareil identique au premier, fonctionnant comme récepteur; ils modifient l'aimantation du barreau correspondant et déterminent dans la plaque des mouvements de même période.

Mais ce n'est qu'en 1883 que J. Hopkinson démontra, par des expériences sur les machines qui existaient à cette époque et qui étaient d'ailleurs bien mal appropriées à cet usage, les machines magnétoélectriques de Méritens, qu'un alternateur peut fonctionner comme moteur synchrone.

Cette propriété se comprend aisément : supposons que dans un alternateur à champ constant excité, par exemple, au moyen d'un courant continu et tournant avec une certaine vitesse, on lance un courant alternatif qui soit à chaque instant de signe contraire au courant que cet alternateur engendrerait lui-même s'il était mû par des forces extérieures et s'il possédait une vitesse égale, entre l'induit et l'inducteur des actions électromagnétiques vont se produire qui seront de sens contraire à celles qui

apparaîtraient dans l'alternateur fonctionnant comme générateur; or, d'après la loi de Lenz, ces dernières ont un sens tel qu'elles s'opposent au mouvement, les forces électromotrices dans l'alternateur, devenu récepteur, sont donc motrices et elles pourront vaincre des résistances appliquées sur son axe; en d'autres termes, l'alternateur joue maintenant le rôle d'un moteur.

Mais nous avons admis que le moteur avait, au préalable, été amené à une vitesse angulaire correspondant à la fréquence du courant, à la vitesse de synchronisme; il ne pourra donc en aucun cas, même à vide, démarrer seul; de plus il devra avoir été couplé avec la ligne au moment où il est en phase avec le courant d'alimentation, autrement il s'arrêterait rapidement, il se décrocherait, comme on dit; remarquons enfin que les inducteurs doivent être excités à part au moyen d'un courant continu et que le moteur se décrocherait pour une surcharge momentanée supérieure à une certaine limite, et nous comprendrons qu'un tel dispositif ne saurait guère être utilisé que dans des cas très spéciaux et que son emploi demande alors de grandes précautions.

Une étude plus complète amène cependant à reconnaître chez ces moteurs une propriété très intéressante; par suite des phénomènes de self-induction dont ils sont le siège, ils produisent un décalage du courant par rapport à la tension et l'on conçoit que, dans des conditions déterminées, un moteur puisse être traversé par un courant déwatté en avant d'un quart de période sur la tension entre ces

bornes, dans ce cas il jouera le rôle d'un condensateur, c'est-à-dire qu'il améliorera le facteur de puissance d'un réseau sur lequel il aura été branché en dérivation. Pour produire ce résultat il convient que le moteur ait été hyperexcité, c'est-à-dire que le champ ait été renforcé par rapport à ce qu'il devrait être pour la charge du moteur.

D'autre part, dans les distributions, la plupart des récepteurs ordinairement employés demandent des courants déwattés en retard sur la tension, l'introduction, en dérivation, d'un moteur synchrone, qui sera parcouru par un courant déwatté en avant, permettra d'amener seulement, aux bornes communes des récepteurs, des courants wattés qui se partageront entre les deux genres de récepteurs en courants convenablement déwattés; et, de cette manière, il sera possible de faire une économie sérieuse dans les fils de ligne qui ne recevront plus que des intensités sensiblement inférieures à celles qu'ils auraient, sans cet artifice, dû supporter.

Dans la plupart des réseaux qui distribuent l'énergie, les courants utilisés ne sont pas alternatifs simples, mais en général polyphasés, aussi fait-on peu usage des moteurs dont nous venons de parler, tandis qu'on emploie parfois des moteurs synchrones polyphasés.

Le principe de ces appareils est le même que celui des moteurs à simple phase; l'induit est, en quelque sorte, un groupement d'autant d'induits qu'il y a de phases, l'inducteur mobile devra, encore, être lancé à la vitesse convenable et être parcouru par un

courant d'excitation continu. Ces moteurs pourront, eux aussi, se décrocher s'ils ne sont pas bien en phase ou si la charge devient trop grande et ce décrochage, fâcheux en lui-même, aurait en outre l'inconvénient, si l'on n'y prenait pas garde, de produire dans l'induit une élévation de l'intensité capable de brûler le moteur.

Mais les moteurs polyphasés sont plus stables que les monophasés, le couple auquel ils donnent naissance prend plus aisément une valeur sensiblement constante, et il est facile, pour les mettre en marche, de disposer, grâce aux propriétés des courants polyphasés, d'un moteur auxiliaire plus ou moins rudimentaire qui peut être constitué par un circuit secondaire placé sur l'inducteur même; enfin, à puissance égale, ils peuvent être construits dans des conditions de légèreté plus grande; ce sont là des avantages particuliers qui les rendent utiles dans les transmissions d'atelier.

§ III. — LES MOTEURS ASYNCHRONES.

S'il n'existait que des moteurs synchrones, les courants alternatifs ne sauraient guère être employés, au moins directement, à la transmission de l'énergie mécanique dans les cas que l'on rencontre le plus fréquemment et où l'on désire réaliser des vitesses variables; mais on construit, nous l'avons dit, des moteurs asynchrones pour lesquels la vitesse de la partie tournante n'est pas nécessairement liée à la période du courant de la distribution.

Dans ces moteurs, l'appareil immobile, qui, le

plus généralement, sera connecté au réseau, s'appelle le stator, tandis que l'appareil qui tourne, grâce aux réactions réciproques du champ et des courants, est souvent désigné sous le nom de rotor[1].

Le stator peut jouer le rôle d'inducteur ou d'induit, dans les moteurs il fonctionnera le plus souvent comme inducteur, c'est lui qui produira le champ ; ce champ peut être, suivant le bobinage de l'inducteur, un champ tournant ou, au contraire, un champ alternatif, variant périodiquement de valeur, mais conservant toujours la même direction.

Pour avoir un champ tournant, on emploiera, bien entendu, des courants polyphasés ; la théorie de ces moteurs est, en somme, assez simple, elle a été donnée d'une façon très complète par M. Potier.

Le stator sera un cylindre creux de fer doux feuilleté qui, si l'on dispose par exemple d'un courant triphasé, portera un nombre de rainures égal à un multiple de trois, dans lesquelles on disposera, soit en étoile, soit en triangle, les trois enroulements correspondants aux trois phases, ce stator ainsi actionnné par le triphasé créera un flux tournant qui fera un tour par période.

Dans ce champ sera disposé le rotor qui, généralement, sera également un cylindre de fer doux feuilleté, ayant le même axe que le stator et dont le diamètre extérieur sera inférieur de quelques milli-

1. Certains auteurs désignent sous le nom de stator l'inducteur d'un moteur asynchrone, et sous le nom de rotor l'induit ; il résulte de cette définition que, dans les machines ou l'inducteur est mobile, la partie fixe est cependant appelée rotor, et la partie en mouvement stator ; ces désignations, qui paraissent alors singulières, prêtent parfois à des confusions.

mètres au diamètre de ce stator. Le rotor porte également des rainures parallèles aux génératrices où seront encastrées des barres conductrices ; si ces barres sont, à leurs extrémités, réunies par des anneaux, on a ce que l'on appelle, à cause de l'aspect que prend alors l'induit, un rotor à cage d'écureuil ; dans d'autres cas, les tiges forment un certain nombre de circuits séparés, régulièrement disposés sur la carcasse en fer.

Le champ tournant du stator développera, dans le rotor, des courants induits qui, d'après la loi de Lenz, sont d'un sens tel qu'ils s'opposent au mouvement du champ, et les actions électromagnétiques qui vont s'exercer sur ces courants seront, par suite, dirigées de telle façon que le champ tendra à entraîner l'induit dans sa rotation. Tout se passera comme s'il y avait une sorte de frottement entre le champ et l'induit et le système se peut comparer à un embrayage à friction où la partie clavetée sur l'arbre moteur entraîne la partie calée sur l'arbre conduit. Dans un embrayage de ce genre, il se produit, suivant le degré plus ou moins élevé d'adhérence que possèdent les substances frottantes, un glissement de l'une des parties par rapport à l'autre ; de même dans le moteur asynchrone, le rotor tournera moins vite que le champ et la différence des deux vitesses angulaires sera encore appelée glissement.

On peut, sans difficulté, calculer le couple moteur appliqué au rotor ; il faut, bien entendu, tenir compte de ce que le champ qui agit sur chaque spire n'est pas seulement le champ du stator mais

la résultante de ce champ et de celui produit par le rotor lui-même; l'expression du couple peut être assez compliquée, mais l'allure générale des phénomènes restera toujours semblable à celle que présente le cas simple où le flux résultant tournerait sans déformation ni variation et où le rotor serait constitué par des cadres rectangulaires dont deux côtés sont disposés suivant des génératrices, dans ce cas, si on alimente le moteur à tension constante, le couple sera proportionnel au glissement et inversement proportionnel à la résistance des circuits du rotor; pour un même glissement et une même résistance, le couple est proportionnel au carré de la tension efficace.

On pouvait prévoir que le couple s'annulerait en même temps que le glissement, puisque le rotor, tournant alors avec la même vitesse que le champ, se trouve avoir, par rapport à ce champ, une vitesse nulle, et qu'il ne saurait plus, dans ces conditions, se produire aucun courant induit.

Ainsi apparaît nettement la grande différence entre les moteurs synchrones et les moteurs asynchrones; pour les premiers, le champ inducteur et le champ induit se suivent rigoureusement, les vitesses doivent être identiquement les mêmes; pour les seconds, au contraire, le glissement est le caractère nécessaire: sans glissement le moteur n'a plus de puissance.

Le synchronisme ne serait réalisé que si le moteur marchait complètement à vide et si l'on pouvait supprimer tous les frottements intérieurs; dès que la charge augmente le glissement croît, comme dans le

cas d'un embrayage où le serrage serait insuffisant ; le fonctionnement est donc stable puisque le couple augmente avec le glissement, si la charge vient à prendre brusquement une valeur plus grande ; toutefois, le courant du rotor pourrait acquérir alors des valeurs considérables qui correspondraient à un dangereux dégagement de chaleur.

En fait, le glissement ne dépasse guère 3 à 4 pour 100 de la vitesse angulaire, et les moteurs asynchrones restent pratiquement bien près du synchronisme et tournent normalement avec une vitesse sensiblement constante. On peut cependant employer divers artifices pour faire varier cette vitesse ; l'introduction de résistances non inductives dans le circuit d'un induit polyphasé indiquée par M. Leblanc, le changement du nombre des pôles de l'inducteur obtenu par une modification du couplage des enroulements, l'alimentation par des courants de fréquences variées, sont des moyens qui suivant les cas, sont utilisés avec succès.

Lors du démarrage en charge, si la résistance du rotor était invariable, il ne pourrait supporter, sans être brûlé, le courant très élevé qui le traverserait ; dès 1890 M. Leblanc a indiqué un procédé, à peu près universellement employé aujourd'hui, qui remédie à cet inconvénient, les bobinages de l'induit sont reliés à des bagues isolées sur l'arbre de la machine et l'on peut ainsi introduire aisément des résistances de démarrage ; toutefois, si l'on ne veut pas perdre l'avantage que présentent les appareils à cage d'écureuil de pouvoir tourner sans aucun contact extérieur on adopte d'autres dispositifs, par exemple, les solu-

tions remarquablement ingénieuses qu'a proposées M. Boucherot.

Si, dans une machine semblable à celle que nous venons de décrire, l'on fait tourner le rotor au moyen d'une force extérieure, empruntée par exemple à une machine à vapeur, de telle façon qu'il marche plus vite que le champ du stator, on a un système dont la théorie est entièrement parallèle à celle du moteur ; les formules se retrouvent les mêmes, mais le glissement est maintenant négatif, le couple, au lieu d'être moteur, est devenu résistant. La machine va fonctionner comme génératrice : aux bornes du stator apparaît une tension qui se superposera à celle de la distribution et une nouvelle quantité d'énergie sera fournie au réseau.

C'est M. Maurice Leblanc qui a découvert le principe de ces appareils que l'on appelle des génératrices asynchrones parce qu'elles fournissent à un circuit des courants alternatifs de fréquences bien déterminées, tout en tournant avec une vitesse plus grande que celle du synchronisme. Le circuit doit, bien entendu, être déjà parcouru par un courant régulier, produit par des alternateurs synchrones qui, comme le dit d'une manière pittoresque, M. Leblanc battent la mesure, ces alternateurs jouent, en quelque sorte le rôle d'excitatrice à l'égard des génératrices asynchrones, elles fournissent les courants déwattés qui sont nécessaires pour entretenir le champ tournant et, à leur tour, les génératrices apportent au réseau des courants wattés qui viennent accroître l'énergie du réseau de distribution.

Elles possèdent encore, ces curieuses et intéressantes machines, d'autres propriétés précieuses qui ont été mises en évidence par M. Leblanc et par M. Boucherot; elles permettent d'obtenir un compoundage commode et qui persiste pour toutes les charges, elles agissent comme frein dans la traction sur des pentes trop rapides. Dans la descente, il suffira de laisser croître la vitesse au-dessus de la normale en palier, le moteur, devenu générateur, servira à récupérer, sous forme d'énergie électrique restituée au réseau, une partie du travail de la pesanteur.

Au lieu d'avoir, comme champ inducteur, un champ tournant, on peut produire un champ alternatif, mais de direction fixe, dans lequel se trouvera un rotor constitué par un système induit, fermé sur lui-même, tout à fait analogue aux rotors précédents; on constituera ainsi des moteurs asynchrones à courant alternatif simple. C'est encore M. M. Leblanc qui a montré que l'on pouvait réaliser de tels moteurs ; M. Potier, M. Blondel, M. Ricardo Arno en ont fait la théorie qui est, en somme, un cas particulier de la théorie générale des moteurs à champ tournant; l'induit est entraîné par la rotation du flux, résultant de la composition du flux alternatif de l'inducteur et du flux engendré par l'induit lui-même. M. Brown, puis plusieurs autres électriciens, ont construit des appareils de ce genre qui ont rendu des services dans des distributions à courant alternatif ordinaire, comme c'est le cas, à Paris, pour les secteurs des Champs-Élysées et de la Rive Gauche.

Mais ces moteurs ont des inconvénients : la matière y est mal utilisée ; ils seront, par conséquent, assez lourds ; d'autre part, ils ne peuvent démarrer seuls et il faut, pour les mettre en marche, employer des procédés plus ou moins compliqués, brancher, par exemple, sur l'inducteur des enroulements auxiliaires.

§ 4. — LES MOTEURS SÉRIE ET LES MOTEURS A RÉPULSION

Malgré ces artifices, trop compliqués d'ailleurs, le démarrage est toujours difficile et parfois incertain ; le moteur à courant alternatif simple, puissant et pratique, restait à trouver, et le problème avait une haute importance ; particulièrement, il serait fort avantageux de pouvoir employer pour la traction le courant monophasé qui n'exige qu'un seul fil aérien, quand on utilise les rails comme conducteurs de retour.

Dans ces dernières années, plusieurs ingénieurs se sont attaqués, non sans succès, à cette intéressante question, et l'on possède aujourd'hui des appareils qui fonctionnent d'une manière satisfaisante.

Depuis longtemps, on a remarqué qu'un moteur série à courant continu peut être, en principe, alimenté par un courant alternatif simple. Nous avons vu, en effet, que si l'on vient à changer simultanément le courant dans l'inducteur et dans l'induit d'un tel moteur, ce moteur continue à tourner dans le même sens ; l'organe mobile est toujours soumis à un couple pulsatoire qui dépend du carré de l'in-

tensité et dont le signe reste invariable quand l'intensité se renverse.

Mais, en fait, les phénomènes d'hystérésis, les courants de Foucault et la self-induction empêcheraient l'appareil de fonctionner s'il n'était construit d'une manière spéciale. Il convient, tout d'abord, de feuilleter l'inducteur comme l'induit lui-même; mais, si l'on réduit ainsi suffisamment les courants de Foucault, on n'améliore pas la commutation qui est extrêmement mauvaise dès que la puissance devient un peu considérable. Aussi, pendant assez longtemps, les moteurs de ce genre ne reçurent-ils que des applications modestes : ils servaient, par exemple, à faire mouvoir des ascenseurs; la facilité avec laquelle ils démarrent les rendaient assez propres à cet usage.

Mais, dès que l'on veut obtenir une valeur un peu élevée du facteur de puissance, on est obligé de diminuer beaucoup l'entrefer et la réaction de l'induit devient considérable. D'autre part, dans le bobinage de l'induit que les balais mettent en court-circuit, des forces électromotrices alternatives, engendrées par la variation du flux de l'inducteur, viennent encore augmenter la difficulté de la commutation. Pour remédier à ces graves inconvénients, on peut songer à divers artifices. On disposera, par exemple, sur l'inducteur un enroulement compensateur transversal, capable de produire un flux opposé au flux propre de l'induit, et, d'autre part, on introduira des résistances entre le collecteur et l'induit pour diminuer les variations d'intensité en court-circuit.

Dès 1901, M. Marius Latour avait indiqué un autre

procédé, élégant et ingénieux, pour supprimer les forces électromotrices nuisibles; ce procédé consiste à employer un enroulement auxiliaire qui produit un champ décalé à angle droit par rapport au champ principal.

Un précieux avantage des moteurs série est de pouvoir, assez aisément, fonctionner aussi bien avec du courant continu qu'avec du courant alternatif; pour certains tramways, l'on peut ainsi passer commodément d'une distribution avantageuse, hors la ville, à une distribution, plus prudente, à l'intérieur de la ville même.

Il existe encore d'autres moteurs à courants monophasés reposant sur un principe différent; on les appelle les moteurs à répulsion. Entre les pôles d'un inducteur excité par le courant alternatif, on dispose un induit analogue à celui d'une dynamo ordinaire dont les balais sont mis en court-circuit.

Si les balais étaient calés sur la ligne neutre ou sur la ligne des pôles, l'induit resterait, on le voit aisément, immobile; mais, si leur axe est incliné d'une trentaine de degrés par rapport à l'axe d'enroulement de l'inducteur, un couple prend naissance à cause des actions électromagnétiques qu'exerce le champ sur les courants induits dans l'anneau mobile. Au synchronisme, ce moteur à répulsion a une commutation parfaite, parce que le flux tourne alors avec la même vitesse que l'induit. A l'Exposition de 1889, M. Elihu Thomson avait déjà présenté un appareil de ce genre, mais qui, à cause de son rendement très médiocre, n'avait guère attiré l'atten-

tion ; depuis lors, le système s'est perfectionné et répandu, et on a fait un assez grand usage d'un moteur à répulsion d'Atkinson.

Très récemment, M. Marius Latour, puis MM. Winter et Eichberg ont eu l'idée fort heureuse d'associer, en quelque sorte, les avantages du moteur série et du moteur à répulsion et ils ont ainsi construit des moteurs, dits à répulsion compensés, qui ont un couple de démarrage élevé et une excellente commutation à la vitesse du synchronisme ; pour cette vitesse, le facteur de puissance est d'ailleurs égal à l'unité. Ces appareils comportent deux paires de balais, ou plus généralement deux fois autant de lignes de balais que le moteur série correspondant ; les balais de l'une des paires sont en série avec l'inducteur et avec la ligne comme dans un moteur en série ; ceux de l'autre paire sont réunis en court-circuit, comme dans le moteur à répulsion.

On ne saurait encore donner de ces moteurs une théorie aussi achevée que celle qu'a édifiée M. Potier pour les moteurs asynchrones, mais, cependant, ils sont considérés, à juste titre, comme les meilleurs moteurs à courant alternatif simple et leur emploi se répand tous les jours.

L'étude, forcément un peu rapide, que nous venons de faire suffit au moins pour démontrer que l'industrie possède actuellement des moyens commodes et nombreux qui permettent de transformer l'énergie électrique en énergie mécanique et que, grâce à son extrême souplesse, l'électricité s'accom-

mode, pour ainsi dire, aux divers besoins de l'homme.

Les moteurs électriques ont les qualités les plus précieuses; nous avons vu combien leur mise en marche, leur arrêt, leurs changements d'allure étaient obtenus aujourd'hui par des procédés simples; ils sont, relativement à leur puissance, d'une grande légèreté et par suite d'un prix peu élevé, par exemple un moteur de 100 kilowatts pèse entre 4.000 et 3.000 kilogrammes; leur rendement est excellent et ils restituent aisément 92 pour 100 de l'énergie qu'ils reçoivent; ils sont peu encombrants, peu dangereux à manier; ils peuvent être construits d'une manière parfaitement appropriée aux divers usages que l'on en doit faire; il est facile, avec eux, de dresser des avant-projets qui ne conduisent à aucun mécompte. Une fois installés, ils se prêtent aux transformations qu'imposeraient des changements survenus dans l'exploitation, et les conditions où ils travaillent sont toujours faciles à contrôler, ils comportent des mesures précises exécutées avec des instruments très simples et ils permettent de suivre et de régler avec une parfaite exactitude la marche de toute usine.

Tous ces avantages ont rendu dès aujourd'hui leurs applications véritablement innombrables.

Grâce aux travaux de divers ingénieurs, on a construit des modèles qui conviennent admirablement pour les transmissions dans les ateliers, et l'on voit aujourd'hui beaucoup de grandes entreprises, particulièrement de filature et de tissage, où l'on n'utilise plus ces lourds arbres de couche, ces poulies dangereuses, ces courroies embarrassantes qui por-

taient autrefois, avec fracas, la vie à toutes les machines-outils.

Dans les navires, ce sont les moteurs électriques qui actionnent les treuils, commandent les tourelles cuirassées; dans les chantiers, ils mettent en mouvement les grues, les appareils de levage; dans les mines, leur usage se répand chaque jour, ils servaient depuis assez longtemps à faire marcher les pompes, les ventilateurs, les tracteurs; depuis quelque temps, on les utilise pour commander la machine d'extraction elle-même.

On pouvait récemment voir, à l'Exposition de Liège, une série de plans et de notices très instructives à cet égard. En Belgique, en Allemagne, le progrès a été extrêmement rapide; en France, il reste encore beaucoup à faire pour profiter des avantages et de la sûreté que le matériel électrique peut apporter à une exploitation minière.

Rappelons enfin le prodigieux développement des réseaux de tramways et les applications à la traction sur lesquelles nous reviendrons un peu plus loin.

Mais si le présent est déjà très satisfaisant, l'avenir semble réserver des promesses plus brillantes encore; et, comme a dit dans une remarquable et savante étude sur les moteurs, un électricien très distingué, M. Hillairet, qui a beaucoup contribué, par ses propres travaux, à préparer cet avenir : « Il arrivera une époque, probablement assez rapprochée, où la surface de toute l'Europe et de bien d'autres régions sera desservie par des réseaux de distribution d'énergie plus serrés que les réseaux télégraphiques et téléphoniques. Peu à peu les grands établissements

industriels, comme les plus modestes, trouveront avantage à se relier à ces distributions qui pourront, grâce à leur importance, débiter l'énergie électrique à bon compte ».

Ainsi, les moteurs électriques devenus d'un usage facile et peu coûteux se subtitueront, sans doute, progressivement, à tous les autres moteurs encombrants et malaisés à conduire.

CHAPITRE VI

Le transport de l'énergie électrique.

---

§ 1. — LES CONDITIONS ÉCONOMIQUES DU TRANSPORT

Depuis longtemps, on a remarqué que l'énergie, sous forme électrique, se transporte avec une facilité toute particulière : un simple fil conducteur, suspendu à des supports isolants, pourra porter au loin l'énergie que débite un appareil générateur mis en mouvement en quelque endroit où l'on disposera commodément d'une force motrice peu dispendieuse. Au point d'arrivée, l'on installera un récepteur qui absorbera l'énergie électrique ainsi amenée et restituera, en compensation et suivant les besoins, de l'énergie thermique, chimique ou bien, et c'est le cas que nous envisagerons ici plus particulièrement, du travail mécanique.

Le jour même où l'on découvrit le courant, l'on s'aperçut que l'électricité pouvait jouer le rôle d'un véhicule d'énergie, mais il n'y a guère que vingt-cinq ans que ce rôle prit, sur la scène industrielle, sa véritable et grande importance. On doit à M. Mar-

16

cel Desprez d'avoir par de nombreuses publications attiré, le premier, l'attention du grand public sur cette passionnante question qu'il appelait le transport de la force par l'électricité; il réalisa d'ailleurs en 1882 des expériences frappantes qui prouvèrent, par leur incontestable succès, qu'il était possible d'effectuer des transports à grande distance dans des conditions économiques de rendement. On ne saurait citer ici les noms des nombreux électriciens qui, depuis cette époque, ont consacré leurs fructueux efforts à résoudre les problèmes multiples qui se posèrent, lorsque les applications se multiplièrent de toutes parts; peut-être convient-il, cependant, de rappeler le nom du savant allemand Fröhlich qui, avec une sûreté remarquable, établit les solides fondements sur lesquels repose la théorie des transmissions électriques d'énergie.

La commodité offerte par l'électricité est trop évidente pour qu'il soit besoin d'insister, mais il ne suffit pas, dans l'industrie, qu'une solution soit commode pour qu'on la doive adopter; encore faut-il qu'elle soit bonne au point de vue économique. Et, qu'il s'agisse d'un grand industriel ou d'un modeste ouvrier, il faudra toujours examiner s'il y a avantage à se procurer, en un point donné, l'énergie amenée à l'usine ou à l'atelier par la canalisation électrique ou à s'adresser, au contraire, à quelque autre source, machine à vapeur, à gaz, ou moteur hydraulique branché sur une distribution d'eau.

Cet examen est, en vérité, souvent très délicat, et dans la pratique il y a lieu d'envisager sous des aspects très divers ces questions nombreuses et

complexes. On comprend que pour connaître les conditions les plus favorables, il convient de se demander d'abord quel sera le rendement industriel d'une transmission et, par là, on entend le rapport de la puissance recueillie au point d'arrivée à la puissance mécanique disponible au départ.

On démontre aisément que ce rendement est le produit du rendement de la génératrice par le rendement de la réceptrice et par le rapport de la puissance disponible aux bornes du moteur à la puissance disponible aux bornes de la génératrice.

En d'autres termes, il faut, pour apprécier une transmission, connaître trois facteurs et si l'on veut obtenir de bons résultats, on devra donner à chacun d'eux la plus haute valeur possible; nous avons déjà étudié les machines fonctionnant comme productrices ou comme réceptrices et nous savons que leur rendement dépasse aisément 90 p. 100; l'énergie que l'on perd, en passant par leur intermédiaire, est donc peu considérable, ce sont de fidèles serviteurs qui savent économiser la dépense. Mais le troisième facteur, que l'on désigne sous le nom de rendement de la ligne, sera souvent moins favorable, la puissance se dissipe en route et il faut tâcher de diminuer cette fuite si nuisible.

Une première précaution, dont l'utilité est bien évidente, consistera à isoler la ligne avec le plus grand soin; on pourrait croire, de prime abord, que cette tâche incombe toute entière au constructeur d'appareillage et que la Science pure se peut désintéresser d'une question d'apparence si simple. La détermination de la meilleure forme à donner aux isolateurs,

l'installation de poteaux convenables dans les lignes aériennes, et celle de câbles bien isolés dans les canalisations ont fait, en effet, l'objet de recherches fort intéressantes qui appartiennent au domaine de la technologie ; mais depuis que l'on a été amené à utiliser des tensions fort élevées, des phénomènes, jusque-là négligeables, ont pris une importance considérable, et pour les étudier et pour remédier à leur fâcheuse influence, il faut procéder avec des méthodes qui sont identiques à celles que le physicien met en œuvre dans son laboratoire.

D'un conducteur placé dans l'air et porté à un haut potentiel sortent des aigrettes violacées, et ce conducteur perd ainsi par effluves une partie de son énergie électrique ; dans les idées qui règnent actuellement, on considère que le corps émet des électrons qui se dispersent à travers l'espace. Des étincelles disruptives peuvent éclater aussi entre les lignes d'une part et les supports des isolateurs ou les autres corps environnants d'autre part, si la distance qui sépare ces conducteurs est inférieure à la distance explosive. Quand le fil est entouré d'un isolant solide, ce diélectrique sera percé s'il n'a pas une rigidité électrostatique suffisante, c'est-à-dire si le quotient, sensiblement constant pour une substance déterminée, de la tension à laquelle correspond l'étincelle disruptive par l'épaisseur traversée, n'est pas assez élevé pour l'isolant choisi. Toutes ces conditions sont parfois difficiles à observer, et pour les respecter, il est bon de connaître les travaux sur les électrons et aussi les mémoires qu'ont publiés divers physiciens, comme MM. Bichat et Swyngedauw,

sur les distances explosives, ou encore les belles expériences de M. Bouty sur la rigidité des gaz.

Notons encore qu'un calcul très simple permet une économie considérable. Dans un câble, toute la masse de l'isolant n'est pas soumise aux mêmes différences de potentiel par centimètre d'épaisseur ; la chute est beaucoup plus forte dans le voisinage du conducteur qu'à la périphérie ; c'est donc dans les parties centrales seulement qu'il faudra employer des isolants coûteux, à grande rigidité électrostatique.

Malgré toutes les précautions que savent prendre aujourd'hui les électriciens, ainsi conseillés par la théorie, le rendement de la ligne restera toujours un peu diminué par les défauts d'isolement ; mais la perte de puissance due à cette cause est très faible par rapport à la dissipation considérable qui se produit sous forme de chaleur.

Rien ne saurait empêcher cette dégradation de l'énergie électrique, et la loi de Joule est inflexible : un conducteur parcouru par un courant laisse, pendant une seconde, tomber, sous forme de chaleur, une quantité d'énergie égale au produit de sa résistance par le carré de l'intensité de ce courant ; si l'on veut que le rendement de la transmission ne soit pas trop mauvais, il est donc de toute nécessité de diminuer autant que faire se pourra la valeur de ce produit, c'est-à-dire celle de l'un ou de l'autre facteur, ou encore des deux à la fois.

Pour diminuer la résistance, il faudra adopter pour la ligne des conducteurs de faible résistivité et

leur donner une section très notable; des câbles ainsi constitués atteignent rapidement des prix exagérés. Rien n'est plus simple que d'abaisser l'intensité; mais si la tension restait constante, on abaisserait, en même temps, la puissance transmise. Heureusement, l'énergie électrique dépend de deux facteurs, et si l'on augmente la tension en même temps que l'on réduit le courant, la puissance à transmettre pourra rester constante.

On calcule aisément l'avantage économique que l'on retire de l'emploi des hautes tensions; précisons par un exemple. Imaginons que nous voulions transporter une puissance de 5,000 kilowatts à 100 kilomètres, en tolérant une perte d'un cinquième, et supposons que nous disposions seulement d'une dynamo fournissant 100 volts; il nous faudrait une intensité considérable et, par suite, on serait conduit à employer un câble de cuivre d'une section telle qu'aucun support ne pourrait le maintenir; le prix de ce câble serait au moins de 2 millions; si nous faisons, au contraire, la transmission à haut voltage, 50.000 volts si l'on veut, comme dans les installations de la Compagnie du Missouri, la ligne pourra être constituée par un fil de 20 millimètres carrés de section, qui ne coûtera plus qu'une quarantaine de mille francs.

Mais les questions économiques que doit résoudre un ingénieur, lorsqu'il veut installer un transport d'énergie, ne se réduisent pas à des considérations aussi simples, et il est nécessaire de discuter avec soin tous les éléments d'un problème fort complexe. Il convient d'abord de se demander s'il est bien

opportun de s'adresser à l'électricité, et, pour trouver la réponse, il faut comparer les dépenses annuelles des divers systèmes possibles; puis, ce premier point élucidé, il faudra choisir les types et la puissance des machines génératrices et déterminer les conditions diverses du transport, décider quel devra être le rendement à adopter et, par suite, quelle section à attribuer au fil de ligne.

Si l'on veut un rendement élevé, il faudra immobiliser un plus gros capital, puisque la transmission exigera, pour une tension déterminée, beaucoup plus de cuivre; si l'on désire, au contraire, ne pas trop dépenser pour la ligne, on sera obligé de faire un autre sacrifice et l'on ne pourra recueillir que moins de puissance utile à l'arrivée.

Lord Kelvin a, le premier, donné, pour déterminer la solution la plus favorable, une règle très remarquable à laquelle il a été conduit par le calcul, et rien, sans doute, n'est plus propre à faire toucher, pour ainsi dire, du doigt le caractère scientifique de l'évolution de l'industrie contemporaine qu'un tel exemple de résultats importants, au point de vue économique, obtenus par une méthode mathématique ! La règle à laquelle est arrivé l'illustre physicien s'énonce ainsi : le prix auquel se pourrait vendre l'énergie perdue annuellement dans la ligne devra être égal à l'intérêt et à l'amortissement du capital dépensé pour établir cette ligne. Il résulte de cette règle que la densité du courant, qui correspond au minimum de frais, est indépendante de la tension initiale, de la puissance à transmettre et de la longueur de la ligne.

Cette règle ne suffit pas pour résoudre toutes les questions possibles ; mais, sur le modèle imaginé par l'illustre physicien, on peut établir des propositions analogues ; l'une d'elles, en particulier, ferait connaître quelle est la tension la plus favorable pour la transmission.

§ 2. — LES TRANSFORMATEURS STATIQUES.

L'utilité des hautes tensions a été comprise depuis assez longtemps, mais les anciennes dynamos à courant continu étaient incapables de produire des voltages un peu élevés ; des étincelles aux balais se produisaient rapidement et, par leur dangereuse violence, elles empêchaient d'obtenir de bons résultats.

L'alternateur fournit beaucoup plus aisément des forces électromotrices efficaces élevées et, grâce à cette propriété, le courant alternatif est né, il y a quelque vingt ans, à la grande vie industrielle. Une grave infirmité aurait cependant ralenti son essor, si le remède ne s'était trouvé à côté du mal : sous un voltage efficace supérieur à 300 volts, le courant alternatif n'est guère utilisable dans la pratique, parce qu'il est très dangereux pour les personnes qui viendraient à approcher des conducteurs qu'il traverse. Dans les circuits d'utilisation il faut donc abaisser le voltage, sans perdre cependant si faire se peut, de l'énergie et c'est cette transformation que les propriétés même du courant alternatif vont permettre de réaliser avec les appareil

simples, robustes, n'exigeant aucune surveillance, qu'on appelle les transformatenrs de tension.

On sait que toute variation de flux magnétique engendre dans un circuit une force électromotrice induite ; dans les machines cette variation est produite par le mouvement relatif d'un inducteur et d'un induit, et l'on recueille de l'énergie électrique correspondant au travail mécanique dépensé dans ce mouvement. Mais, on peut faire varier le flux qui traverse un circuit induit ou secondaire, en faisant simplement changer l'intensité du circuit inducteur ou primaire, les deux circuits restant entièrement immobiles ; dans ce cas il n'y a aucun travail mécanique dépensé ou produit, de la puissance électrique a été fournie au primaire pour entretenir les variations d'intensité du courant, et l'on retrouve de la puissance électrique dans le secondaire.

Cette transformation s'opérera d'elle-même, et d'une manière continue, si le courant inducteur est un courant alternatif ; le courant induit créé par un flux périodique sera également alternatif ; maintenant aux bornes du primaire une certaine différence de potentiel efficace, qui entretiendra dans ce circuit une certaine intensité efficace, on recueillera dans le secondaire un autre courant alternatif sous une autre différence de potentiel efficace. La puissance sera, pour ainsi dire, transportée d'un des bobinages à l'autre et ce transport, qui ne se fera pas cependant sans quelques pertes, pourra rendre les plus grands services, parce que la valeur relative des deux facteurs, différence de potentiel et intensité, dont dépend la puissance aura pu être modifiée,

le courant dont on disposait d'abord et qui était, par exemple, à haute tension et à basse intensité sera maintenant remplacé par un courant à basse tension et à haute intensité.

Pour augmenter les effets d'induction, il conviendra, bien entendu, d'enrouler les deux bobines sur un même noyau de fer doux qui, dans la plupart des cas [1], constituera un circuit magnétique fermé de façon que la résistance magnétique soit la plus faible possible.

Le noyau sera formé par un empilage de tôles minces, bien séparées les unes des autres par un enduit ou du papier isolant, afin d'éviter, dans la mesure du possible, les courants de Foucault ; il importe que ces tôles soient bien serrées, sans cette précaution le transformateur aurait un inconvénient imprévu, par suite des changements de sens dans les actions électromagnétiques dus aux variations alternatives du courant, l'appareil ferait entendre des sons riches en harmoniques fort désagréables.

Les enroulements sont des bobines en cuivre ; les spires consécutives d'une même bobine doivent être très rigoureusement isolées, puisqu'il pourra se produire entre elles des différences de potentiel élevées ; mais il importera encore davantage de bien isoler l'enroulement primaire du secondaire. Le plus souvent les bobinages sont à l'extérieur du noyau de fer ; pour les appareils qui doivent rester cons-

1. On a fait autrefois des transformateurs à circuit couvert et, dans le cas où le secondaire peut-être mis accidentellemer en court-circuit, une telle disposition peut rendre quelqnes se vices en s'opposant à une augmentation dangereuse du courar

tamment branchés sur la distribution, on utilise cependant une disposition dans laquelle le fer entoure presque complètement le cuivre, ce sont les transformateurs cuirassés.

L'idée si simple et si ingénieuse de la transformation est assez ancienne, on peut la trouver en germe dans les expériences exécutées par le célèbre physicien américain Henry aussitôt après la découverte de Faraday, puis déjà réalisée dans la machine d'induction que construisirent, en 1840, Masson et Breguet et, surtout, dans les célèbres bobines de Page et de Ruhmkorff[1] qui sont de véritables transformateurs à circuit magnétique ouvert, mais c'est Gaulard qui fit entrer le principe dans la grande industrie, il comprit nettement que l'appareil qu'il proposait pourrait, en électricité, jouer un rôle semblable à celui que remplissent, en mécanique, les machines simples, leviers ou poulies qui permettent en effet d'augmenter ou de diminuer à volonté l'un des deux facteurs constitutifs du travail, force ou déplacement, mais ne sauraient changer leur produit. On sait que ce génial inventeur mourut pauvre et méconnu, il n'est malheureusement pas nécessaire de remonter à un lointain passé pour trouver, dans l'histoire des découvertes, des exemples de cruelles injustices, puisque les travaux de Gaulard datent à peine d'un quart de siècle.

1. La découverte de Röntgen et l'invention de la télégraphie sans fil ont provoqué, depuis dix ans, de très remarquables recherches sur la bobine d'induction, organe nécessaire dans la production des rayons x et des oscillations électriques; nous laissons ici de côté cette question spéciale que l'on trouvera parfaitement étudiée dans un livre de M. Armagnat.

La théorie des transformateurs est aujourd'hui classique ; par l'application simple des lois de l'induction on démontre bien aisément que, si l'on ne tient pas compte des fuites magnétiques, c'est-à-dire si l'on admet que tout le flux magnétique reste dans le fer, et si, d'autre part, on suppose la résistance des circuits assez faible pour que la chute ohmique de potentiel soit négligeable devant la tension aux bornes, la tension efficace aux bornes du secondaire et la tension efficace aux bornes du primaire sont dans un rapport constant. Ce rapport, dit rapport de transformation, est égal au quotient du nombre de spires du secondaire par le nombre des spires du primaire.

La démonstration ne suppose en aucune façon que le courant inducteur soit sinusoïdal ; dans le circuit induit se reproduira toujours une tension semblable à la tension primaire de quelque façon que celle-ci dépende du temps.

Outre son rôle particulier à l'égard des facteurs de la puissance, le transformateur peut jouer le rôle d'appareil autorégulateur de tension. Dans les distributions d'énergie par courants alternatifs, le courant à haute tension, envoyé par l'usine, sera reçu dans une sous-station où il sera transformé en courant à faible tension et pour maintenir cette tension constante, quel que soit le courant débité, il suffira de maintenir constante la tension aux bornes du primaire.

Dans la pratique, l'emploi des transformateurs pourra être avantageux que si le rendement des a

pareils est suffisamment élevé; il importe donc, au plus haut point, de se rendre un compte exact de la puissance qu'ils laissent dissiper sous forme de chaleur. Ces pertes se font en deux endroits : il y a des pertes dans le fer et des pertes dans le cuivre.

Le noyau de fer est le siège de phénomènes d'hystérésis et aussi, malgré le feuilletage, il est parcouru par des courants de Foucault; ce sont là deux causes d'échauffement parasite de cette armature.

On conçoit aisément que la perte, ainsi occasionnée, doit se produire aussi bien quand le transformateur travaille à vide, c'est-à-dire lorsque le secondaire, étant ouvert, ne débite rien, ou quand, au contraire, le transformateur est en charge, et que le secondaire fournit du courant. On démontre même que, si la tension est maintenue constante aux bornes du primaire, les pertes dans le fer restent toujours les mêmes quelle que soit la charge. Pour réduire ces pertes il faut réduire autant que possible l'induction maxima à laquelle sera soumise le fer et, par suite, diminuer aussi le flux maximum qui est proportionnel à cette induction. Mais pour un certain courant primaire, le flux est en raison inverse du nombre des spires, et l'on est ainsi conduit à augmenter ce nombre et, par suite aussi, si l'on ne veut pas changer le rapport de transmission, celui des spires enroulées sur le secondaire.

Dans ces conditions, l'énergie perdue dans le fer deviendra plus faible, il ne faudrait pas croire cependant que le profit soit certain. En accroissant la longueur des deux circuits, on accroît leur résistance et, en conséquence, la chaleur dissipée dans

le cuivre par l'effet Joule; l'on ne peut atténuer l'une des causes qui diminuent le rendement sans risquer de rendre l'autre plus néfaste.

Il y a donc un juste milieu à chercher; le calcul ici encore servira de guide et permettra de trouver la solution la plus économique. Facilement on arrive à établir que le rendement sera maximum quand les pertes dans le fer égaleront les pertes dans le cuivre et dans ces conditions il peut atteindre 97 p. 100.

Toutefois l'on ne doit pas conclure qu'il convient de toujours employer un transformateur donnant le maximum de rendement. Les appareils placés chez les abonnés restent toujours branchés sur la distribution, parce que la manipulation d'un interrupteur sur le primaire ne laisserait pas que de présenter de sérieux dangers; on perd donc dans le fer, alors même que l'on ne demande aucun débit, une partie de la puissance dissipée quand on se sert du courant et il peut y avoir avantage à ne pas permettre que cette partie devienne (à vide) la moitié de ce qu'elle serait en charge. Dans les transformateurs d'abonnés, il conviendra d'établir un rendement maximum pour le régime moyen que l'expérience fera connaître; la perte dans le cuivre sera, par exemple, double de la perte dans le fer.

Dans les débuts, les transformateurs étaient construits un peu au hasard; aujourd'hui, au contraire, l'imprévu n'a plus qu'une faible part et d'avance l'on peut calculer toutes les conditions que doit remplir un appareil destiné à un usage déterminé. D'ailleurs on peut vérifier si le résultat est bien celui qu'on

attendait et l'on possède des moyens simples de faire l'épreuve d'un transformateur. Cette épreuve comporte deux vérifications aussi importantes l'une que l'autre; il convient de rechercher si le rendement est bon et, d'autre part, si la chute de tension entre la marche à vide et la marche à pleine charge n'est pas trop élevée. Cette dernière condition est fort importante; on ne peut, pour l'éclairage, tolérer que de très légers écarts dans la tension et il faut que l'on puisse être assuré qu'en maintenant constante la tension aux bornes du primaire, on assure bien automatiquement l'invariabilité dans le secondaire. Une méthode très remarquable due à M. Kapp permet des essais très simples et très suffisants pour la pratique.

L'emploi des transformateurs est devenu assez sûr pour que l'on puisse abandonner ces appareils à eux-mêmes ; aucune pièce mobile ne demande une surveillance particulière ; le seul danger à craindre est un échauffement exagéré, les transformateurs ne se ventilant pas naturellement comme le ferait une machine qui tourne. Pour les puissances un peu grandes, il faut parfois avoir recours à des ventilateurs ou à des circulations de liquides. On peut d'ailleurs éviter l'élévation de température, en donnant à l'appareil d'assez grandes dimensions, mais on est arrêté, dans cette voie, par la question du prix de revient et par la diminution du rendement. Les transformateurs, et particulièrement les transformateurs à courants polyphasés, qui demandent naturellement un enroulement particulier pour chaque phase, sont assez dispendieux, et malgré l'ex-

cellence de leur rendement, les pertes ne sont pas négligeables.

Aussi, dans plusieurs installations, a-t-on supprimé les transformateurs de départ et l'on obtient directement les courants à haute tension par les alternateurs que nous connaissons déjà. Toutefois, cette suppression ne va pas sans inconvénients ; le transformateur, à la station génératrice, ne servait pas seulement à élever la tension, il jouait en même temps le rôle de protecteur pour les machines contre les surtensions et les courts-circuits qui pouvaient se produire dans les lignes, et, dans ce rôle, il faut le remplacer par des dispositifs qui parfois ne fonctionnent pas d'une manière aussi sûre.

§ 3. — LES TRANSFORMATEURS POLYMOPHIQUES

La transformation qui consiste à changer la tension et l'intensité, sans modifier la valeur de la puissance, n'est pas la seule que l'on puisse faire subir à des courants alternatifs. D'une façon générale, on peut produire des modifications plus profondes qui atteindront la nature même du courant ; ainsi, on peut imaginer un appareil qui fournisse des courants polyphasés, différents, par le nombre de phases, par la tension et par la fréquence, des courants dont on disposait tout d'abord.

Imaginons un moteur asynchrone, où l'on imprimera au rotor une vitesse de rotation maintenue constamment à une valeur convenablement choisie ; sur ce rotor, disposons des enroulements polyphasés en nombre voulu, et, au lieu de fermer sur eux-

mêmes ces circuits, recueillons les courants produits ; nous pourrons ainsi obtenir tous les changements que nous désirerons.

On voit combien la notion de transformation, ainsi comprise, s'élargit ; les transformateurs statiques représentent la variété la plus simple, mais bien d'autres cas particuliers peuvent être envisagés. M. Hospitalier a donné une classification complète et systématique de tous ces transformateurs qu'il appelle transformateurs polymorphiques ; elle comprend un grand nombre de combinaisons dont plusieurs peuvent présenter un véritable intérêt pratique et se prêter à des réalisations faciles.

Il peut être utile pour diminuer, par exemple, le nombre de fils de lignes, ou pour permettre d'employer des moteurs plus simples, de changer le nombre de phases ; ainsi, au Niagara, on transforme des courants triphasés en courants diphasés, et réciproquement. L'une des solutions possibles a été indiquée par M. Scott :

Considérons deux enroulements portés sur deux noyaux identiques ; l'une de ces bobines a ses deux extrémités respectivement attachées aux fils qui amènent deux des phases de la distribution triphasée ; l'une des extrémités de l'autre bobine est attachée au fil correspondant à la troisième phase, tandis que la dernière extrémité est reliée au milieu de l'enroulement que porte le premier noyau. Il est facile de démontrer que, dans ces conditions, les flux magnétiques qui vont traverser ces noyaux seront diphasés ; si, par suite, on installe sur chacun

d'eux un circuit secondaire, on recueillera des courants diphasés. On peut généraliser le procédé, et, avec des enroulements convenablement connectés, modifier, par un procédé analogue et toujours simple, le nombre des phases.

Il est bien évident d'ailleurs qu'il sera très facile de changer du même coup la tension, en employant des spires plus ou moins nombreuses sur les deux circuits.

Mais la transformation qui aura véritablement la plus haute importance dans les applications sera celle qui permettra de convertir le courant alternatif en courant continu. Si l'alternatif convient admirablement pour le transport de l'énergie, il laisse encore au continu sa vieille supériorité pour l'alimentation des moteurs qui doivent fonctionner avec des démarrages fréquents et des vitesses variées ; il est impropre à la charge des accumulateurs ; il ne saurait guère être utilisé dans les industries chimiques ; il ne peut même fournir l'excitation des alternateurs qui lui ont donné naissance. Des appareils permettant d'obtenir, à bon compte, du courant continu à la place des courants polyphasés qui sont fournis par une distribution, rendront ainsi, dans un grand nombre de circonstances, de signalés services.

Une première solution, qui se présente naturellement à l'esprit, consiste à caler sur un même arbre un moteur à courants polyphasés et un générateur à courant continu. On actionnera le moteur avec les courants de la distribution, et on recueil-

lera, aux bornes de la dynamo génératrice, le continu désiré.

Quelques précautions sont à prendre : les deux machines possèderont la même puissance ; le moteur devra être aussi régulier que possible, parce que ses variations entraîneraient des variations plus considérables encore dans le courant débité par la dynamo. Les groupes ainsi constitués fonctionnent bien, mais la solution n'est pas très bonne au point de vue économique : les deux machines seront d'une acquisition coûteuse et le rendement n'aura qu'une valeur peu élevée.

On obtiendra de meilleurs résultats en produisant le courant continu dans l'induit même qui recevra le courant alternatif ; un appareil, ainsi constitué, s'appelle une commutatrice.

Avec des modifications légères, une machine Gramme devient aisément une bonne commutatrice. Si l'on partage l'induit d'une dynamo ordinaire en un certain nombre de tronçons aboutissant à autant de bagues montées sur l'axe et sur lesquelles appuient des frotteurs, on recueillera à ces frotteurs des courants polyphasés ; le nombre des phases égalera le nombre des tronçons. D'autre part, il reste toujours possible de réunir les balais du collecteur aux extrémités d'un circuit extérieur où l'anneau Gramme enverra un courant continu. Il est bien évident que si la machine fournit ainsi à la fois de l'alternatif et du continu dans deux circuits, l'induit sera en réalité parcouru par un courant variable et l'on doit s'attendre à ce que la tension aux bornes du collecteur ne soit pas fixe. Aussi fait-on assez rarement

débiter, à la fois, les deux courants ; ces dynamos-omnibus rendent quelques services dans les petites installations où, suivant les cas, on utilise l'une ou l'autre manière dont elles peuvent fonctionner.

Mais leur véritable utilité est de permettre un passage facile de l'alternatif simple ou polyphasé au continu ; si l'on fournit aux frotteurs des courants polyphasés, la machine tourne et l'on recueillera aux balais des courants continus, et, réciproquement d'ailleurs, si l'on envoyait un courant continu dans les balais, on obtiendrait, dans des fils reliés aux frotteurs, des courants polyphasés.

La théorie complète de ces commutatrices est aujourd'hui bien connue ; elle a été présentée d'une manière simple et générale par M. Potier.

Dans le cas le plus intéressant pour la pratique, celui de la transformation de l'alternatif[1] en continu, la commutatrice est un véritable moteur synchrone et présente, par suite, les avantages et les inconvénients de ce genre de moteurs. Elle conserve une vitesse constante sur un réseau où la fréquence reste bien invariable, elle élève le facteur de puissance de ce réseau, mais, en revanche, il faut, pour la faire démarrer, user d'un artifice, et, lorsque le courant continu, débité du côté collecteur, devient trop grand,

1. La plupart des commutatrices ne sont pas construites pour des courants alternatifs monophasés, mais pour les courants di ou triphasés beaucoup plus répandus. Dans le cas des courants triphasés, on a intérêt à doubler le nombre des phases dans l'induit ce qui peut se faire aisément par un simple artifice de connexion. La commutatrice à circuit hexaphasé aura, pour une même dépense de matériaux, une puissance qui surpasser d'un quart au moins celle d'un appareil à induit triphasé.

elle peut se décrocher et cesser ainsi de fonctionner. D'autre part, le courant continu fourni aux balais, étant produit par un induit qui est le siège d'un courant d'intensité variable, sera lui-même légèrement ondulé et ces ondulations ne laissent pas que d'être parfois assez incommodes. Le rendement des grandes machines atteint facilement 93 pour 100, c'est là une qualité précieuse qui ne suffit pas, cependant, à compenser tous les défauts, et, dans certaines installations où la régularité du courant s'impose, on ne saurait faire usage de ces commutatrices.

On peut alors s'adresser à d'autres appareils et, particulièrement, aux très ingénieux transformateurs redresseurs imaginés par M. Leblanc. Ces transformateurs permettraient, comme le transformateur de Scott, et par une généralisation du procédé, de passer d'un système possédant un nombre de phases donné à un autre système correspondant à un nombre différent de phases, au moyen d'organes tous immobiles; mais ils donnent particulièrement une solution pratique et élégante de la transformation de l'alternatif en continu ou, s'il en était besoin, de la transformation inverse.

Le convertisseur est un appareil à champ tournant dont il est facile de comprendre le principe ; alimentons le stator d'un alternateur asynchrone par des courants triphasés et disposons, à la place du rotor, un induit fixe bobiné comme un anneau Gramme avec son collecteur. Le flux tournant du stator produit exactement les mêmes effets d'induction que ceux auxquels donnerait naissance un inducteur tournant ; dans l'induit on recueillera un courant

continu si l'on fait tourner les balais avec la même vitesse que le champ. Ce mouvement de rotation peut être obtenu à l'aide d'un petit moteur synchrone alimenté par le courant même qui excite l'inducteur, la position des balais, réglée au début, restera constamment réglée et il ne pourra pas se produire de décrochage ; l'appareil aura néanmoins le défaut grave de comporter des balais tournants, mais on peut éviter la difficulté, en entraînant le collecteur convenablement disposé, au lieu d'entraîner les balais eux-mêmes.

Le dispositif de MM. Hutin et Leblanc est encore plus simple, il rappelle un transformateur statique ordinaire à courants polyphasés, mais le circuit secondaire doit être constitué par un enroulement spécial que l'on ne saurait expliquer simplement.

Récemment on a vu entrer dans le domaine industriel d'autres appareils qui, comme la commutatrice Arnold, transforment directement les courants polyphasés à haute tension en courant continu à faible tension ; cette machine se compose essentiellement d'un moteur asynchrone et d'une dynamo à courant continu, associés de telle façon que l'enroulement du rotor du synchrone se continue par l'enroulement de l'induit de la dynamo ; les bobinages du rotor et du stator sont calculés de façon à produire l'abaissement de tension désiré. Dans la permutatrice Rougé-Fayet, on trouve d'abord un transformateur de tension avec un secondaire hexaphasé qui produit le champ tournant dans le stator.

Quand le courant alternatif ne correspond qu'à

une puissance de quelques chevaux, il est souvent beaucoup plus commode d'employer, au lieu de machines transformatrices, des clapets ou soupapes électrolytiques.

Le principe de ces appareils se trouve dans une curieuse expérience faite en 1857 par Buff. Ce physicien avait remarqué que, lorsque l'on fait l'électrolyse de l'eau dans une auge où l'une des électrodes est en aluminium et l'autre en un métal tel que le plomb par exemple, le courant passe très facilement du plomb à l'aluminium, mais est, au contraire, amoindri dans une proportion considérable, quand on en veut renverser le sens, et que l'aluminium joue le rôle d'anode. On obtient des résultats plus nets en prenant pour électrolyte, comme l'a montré M. Pollak, un phosphate alcalin. L'introduction d'un voltamètre, ainsi constitué, sur un circuit parcouru par un courant alternatif fera le même effet que la mise en place d'une soupape dans une conduite d'eau; seuls pourront passer les courants qui se présenteront dans le sens convenable.

Le phénomène n'a d'ailleurs rien de mystérieux; il tient à la production dans l'électrolyse, lorsque l'aluminium est anode, d'une substance mauvaise conductrice, comme le phosphate d'aluminium, qui s'oppose au passage de l'électricité; tandis que si le courant arrive par l'autre métal, il ne se forme que des corps conducteurs.

Ces soupapes donnent naturellement des courants très ondulés, mais les ondulations s'atténuent si on recueille dans un même conducteur les composantes de courants polyphasés; des clapets fondés

sur ce principe, comme par exemple le dispositif imaginé par M. Nodon, commencent à se répandre dans l'industrie où ils rendent de bons services.

Nous verrons enfin que les lampes à vapeur de mercure du système Cooper-Hewitt peuvent être utilisées comme de véritables soupapes qui fonctionnent jusqu'à des tensions de 1.000 volts et dont le rendement est très élevé : 98 pour 100 environ ; c'est un résultat des plus intéressants qui, dans l'avenir, aura sans doute des applications nombreuses.

§ 4. — LE TRANSPORT ET LA DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE.

Avec ces appareils si variés, répondant à tous les besoins, les transports d'énergie électrique peuvent aujourd'hui se faire dans les conditions économiques qu'indique la théorie.

En 1891, les mémorables expériences effectuées entre Lauffen et Francfort vinrent révéler la possibilité de transmettre l'énergie électrique à grande distance au moyen des courants alternatifs de haute tension et le grand succès de cet essai sensationnel engagea les électriciens dans une voie différente de celle que, neuf ans plus tôt, Marcel Desprez leur avait ouverte.

Une puissance de 300 chevaux, produite à Lauffen au moyen d'un alternateur triphasé, était transportée à 175 kilomètres par des courants dont la tension fut, sans accident, portée à 30.000 volts et le rendement atteignait 74 pour 100. Mais on peut dire qu'au moment où cette transmission réussissait

brillamment, le temps n'était cependant pas encore venu où l'on pouvait, dans l'industrie, utiliser, d'une manière courante, des tensions si élevées et faire des transports à si grandes distances. En réalité la puissance transportée n'était pas assez considérable pour que l'opération fût bien rémunératrice et l'on ne possédait pas encore les appareils et les moyens d'isolement qui permettent aujourd'hui l'emploi des hauts potentiels.

Aussi, dans les années qui suivirent, les applications se restreignirent à de plus modestes proportions. En France, particulièrement, un certain préjugé subsistait contre le courant alternatif auquel, volontiers, on attribuait encore des défauts dont cependant il avait été corrigé déjà, il passait d'ailleurs, pour être d'un emploi très dangereux et cette réputation était, on doit le reconnaître, fort justifiée à une époque où l'on ne savait pas encore prendre toutes les précautions nécessaires.

C'est de l'Amérique, vers 1897, que partit enfin ce mouvement d'opinion qui devait rapidement entraîner toutes les nations civilisées; depuis lors, le nombre des transmissions à grande distance augmente chaque jour et le système à courants triphasés paraît actuellement le plus répandu. Les tensions utilisées se sont élevées dans de fortes proportions; en 1900, on voyait à l'Exposition un câble construit spécialement pour la circonstance, mais qui ne semblait guère qu'une curiosité, ce câble pouvait supporter 30.000 volts; aujourd'hui on en peut faire qui résisteraient à une tension de 100.000 volts. D'une manière régulière, on utilise

en Amérique des tensions de 60,000 volts qui fonctionnent sans aucun inconvénient; la transmission de Colgate et Electra à San Francisco par une ligne de 353 kilomètres se fait actuellement sous ce voltage; en France, le réseau de l'énergie électrique du littoral méditerranéen comporte une tension qui atteint environ 30.000 volts.

La progression continuera sans doute et l'on peut prévoir que les lignes à courant alternatif se développeront encore considérablement, mais il n'est pas certain cependant que, dans la lutte qu'il soutient contre le continu, l'alternatif devra finalement triompher.

Sans l'accuser de parti pris, comme on le fit trop souvent dans les débuts, on doit cependant reconnaître qu'il conserve des inconvénients qui lui sont particuliers : on doit toujours craindre avec lui une rupture brusque qui pourrait provoquer l'apparition d'une force électromotrice considérable due à la self-induction; il faut s'attendre aussi à voir une harmonique prendre une importance exagérée par suite d'un phénomène de résonnance inattendue. En réalité si les alternateurs ne donnent pas une force électromotrice sinusoïdale, la tension maxima peut être double de la tension efficace. Pour toutes ces raisons, malgré l'invention de divers appareils limiteurs de tension, il convient de toujours calculer les isolements pour des tensions beaucoup plus élevées que la tension moyenne.

Aussi les partisans du continu n'ont-ils pas désarmé et l'idée de M. Fontaine et de M. Marcel Desprez n'a pas été abandonnée. Nous avons déjà dit que

M. Thury était parvenu à construire des dynamos continues à très haut voltage et, par de très beaux exemples, cet habile ingénieur a montré que le système série à intensité constante, par courants continus à haute tension, pouvait, lui aussi, se prêter à des transports économiques effectués snr de longues distances.

Dans ce système, le même courant parcourt constamment tous les appareils embrochés sur le circuit, toutes les génératrices d'une part, toutes les réceptrices de l'autre, sont placées en série dans le circuit; on maintient l'intensité constante, quelle que soit la puissance demandée, et, à la station génératrice, c'est la tension que l'on pourra, suivant les besoins, faire varier. Quand un récepteur n'est pas en circuit on le remplace par un conducteur sans résistance de façon à ne pas interrompre le courant ; pour mettre en service le récepteur, on supprime le court-circuit.

Les procédés de M. Thury ont été employés avec beaucoup de succès entre Saint-Maurice et Lausanne sur une distance de 56 kilomètres ; la puissance est transportée par un courant continu maintenu à une intensité constante de 150 ampères et dont la tension peut varier de 0 à 23.000 volts. Plus récemment on a réalisé, en France, un transport de plus de 40.000 kilowatts sous 57.000 volts continus à une distance de 180 kilomètres entre l'usine de la Volta près de Moutiers et Lyon pour l'alimentation des tramways de cette ville. Dès à présent, l'on peut dire que le continu, un instant abandonné, redevient le rival possible de l'alternatif et peut-être dans un

avenir prochain, les persévérants efforts de ses partisans parviendront-ils à lui rendre la première place.

De récentes expériences de M. Thury ont démontré qu'il était possible de diminuer beaucoup la quantité d'énergie qui se perd en ne se servant que d'un seul fil de ligne et en utilisant le retour par la terre. Les améliorations apportées aux procédés d'isolement permettent de maintenir les génératrices et les réceptrices elles-mêmes à un potentiel qui peut atteindre au moins 50.000 volts.

On a proposé aussi un système dans lequel on mettrait à la terre le point neutre des usines au départ et à l'arrivée ; ainsi l'on réduirait de moitié la tension à isoler et deux lignes, l'une à potentiel positif, l'autre à potentiel négatif, pourraient transporter à de très grandes distances une énorme puissance. Dans un projet remarquable et très bien étudié MM. Blondel et Harlé proposent ce système pour amener à Paris la puissance continue de 80.000 chevaux que possède le Rhône entre la frontière suisse et Culoz ; à l'heure presente, ce transport, dont on peut discuter l'utilité économique, ne rencontrerait aucune difficulté grave au point de vue électrique.

De quelque façon que l'énergie soit transportée, depuis l'endroit où l'on peut la produire à bon compte jusqu'à la station centrale qui la doit distribuer, il paraîtra, sans doute, toujours plus commode de faire cette distribution à potentiel constant et, si la région desservie est assez considérable, on n'abandonnera pas alors, pour répartir l'énergie, le courant alternatif.

Ainsi dans le transport Saint-Maurice-Lausanne, type du système à courant continu, l'énergie amenée par le continu est ensuite distribuée par du triphasé.

A l'heure actuelle les distributions se font par des systèmes très variés ; le triphasé à 50 périodes par seconde est particulièrement souple ; il peut être utilisé pour l'éclairage, pour la force, pour la traction, il se prête bien à la transformation avec des appareils peu coûteux et peu encombrants, aussi est-il très en faveur.

Le triphasé à 25 périodes permet beaucoup plus facilement l'emploi de commutatrices qui le transforment en continu ; le biphasé conserve des partisans et le monophasé, un instant délaissé, revient à la mode depuis l'invention de nouveaux moteurs ; à côté de ces divers modes d'alternatif, le continu se développe régulièrement.

Dans le cas du courant continu et dans celui du courant alternatif simple deux fils suffisent pour la distribution[1], et les récepteurs sont branchés en dérivation sur ces fils ; mais, comme la chute de tension entre les bornes de la dernière dérivation ne doit pas être trop différente de celle qui existe entre les extrémités de la première, il est nécessaire d'employer certains artifices. Avec le continu, on utilise beaucoup des conducteurs qui relient directement, et sans qu'on prenne sur eux aucune dérivation, les

1. Dans un assez grand nombre de distributions à courant continu, on utilise cependant des systèmes à 3 et même 5 fils qui permettent, en associant en tension deux ou quatre génératrices électriques, de faire le transport avec l'avantage d'une tension double ou quadruple de celle qui sera envoyée aux bornes des appareils d'utilisation.

points éloignés à la génératrice et qui viennent ainsi nourrir la distribution appauvrie ; ce sont les câbles nourriciers, les *feeders ;* mais le moyen est encore insuffisant et pour compléter le système, il faut, par exemple, intercaler en série, sur chaque feeder, une machine élevant le voltage du nombre même de volts qui se perdra sur la longueur de ce câble ; une telle machine s'appelle un sur-volteur.

Pour le courant alternatif, on utilise surtout les distributions comportant des transformateurs statiques ; on branche en dérivation, sur le circuit à haute tension, les primaires d'autant de transformateurs qu'il sera nécessaire, et chacun des secondaires sera l'origine d'une distribution à deux fils.

Avec les courants diphasés, qui correspondent, en somme, à deux distributions de courant alternatif simple, de puissance égale, il faudra deux fils d'aller et deux fils de retour, ou, au moins, trois fils dont l'un, de section double des autres, servira pour le retour ; avec le triphasé, comme il a déjà été expliqué, il suffit de trois fils égaux. C'est là un avantage sur le diphasé ; mais ce n'est pas le seul, les transformateurs bien symétriques, placés sur la distribution, jouent le rôle de compensateurs maintenant sur les trois fils l'égalité de charge ; cette manière si simple d'assurer la régularité du service est l'une des causes du succès du système à trois phases.

Il peut être nécessaire, avec les courants alternatifs polyphasés, d'élever la tension des feeders trop chargés ou dont la longueur est trop grande ; on a été ainsi amené à construire des sur-volteurs particu-

liers. Les plus simples sont des transformateurs statiques dont le primaire est en dérivation sur le circuit général et le secondaire sur le feeder dont on veut élever la tension. D'autres, plus compliqués, sont de véritables moteurs synchrones où le rotor est immobile ; l'appareil fonctionne comme un transformateur statique, et, si l'on fait tourner légèrement le rotor, on obtient commodément la régularité voulue du voltage.

Ajoutons enfin que, dans beaucoup de distributions, on se sert également d'appareils que l'on appelle maintenant des *boosters* ; ce sont des sous-volteurs destinés à abaisser la tension, quand on juge utile de le faire.

§ 5. — LA TRACTION ÉLECTRIQUE

L'une des industries où les progrès de la distribution de l'énergie électrique ont exercé la plus grande influence est, certainement, l'industrie des transports ; dans un chapitre précédent, j'ai déjà parlé des moteurs appliqués à la locomotion; mais il ne sera pas inutile d'ajouter quelques renseignements sur les tendances actuelles qui se manifestent dans cette importante question de la traction électrique.

Les réseaux de tramways urbains se développent avec une prodigieuse rapidité : plus de 100,000 kilomètres sont actuellement exploités en Amérique, et, si dans les autres pays les progrès sont plus modestes, ils restent encore extrêmement remarquables. Ce n'est point ici le lieu de donner des détails

techniques sur la construction ou l'exploitation des lignes de tramways; aussi bien, chacun sait aujourd'hui, d'une manière générale, comment fonctionne ce procédé de traction.

La solution adoptée est, à peu près, partout la même; le courant, qui est continu et à 500 ou 600 volts, est amené soit par des fils aériens, soit par des conducteurs en caniveau, soit enfin par des contacts superficiels, des plots, qui ne sont chargés qu'au moment même où passe la voiture; recueilli par le trolley ou par des frotteurs, le courant retourne par les rails de roulement, qui doivent être réunis par une résistance aussi faible que possible, et qui, souvent, sont même soudés entre eux. Les moteurs sont des moteurs série qui ont l'avantage de fournir un couple proportionné à l'effort, d'être auto-régulateurs,de présenter un encombrement et un poids assez limité, de posséder un bon rendement. En général, chaque voiture porte des équipements comportant deux moteurs de 30 chevaux environ. Comme les induits tournent beaucoup trop vite, ils ne sont pas calés directement sur l'essieu, mais ils agissent par l'intermédiaire d'un train d'engrenages retardateurs.

Pour régler la vitesse, on se sert d'appareils auxquels on donne le nom de contrôleurs, qui permettent, par le maniement commode d'une manette, d'accoupler les deux moteurs en série ou en parallèle, avec ou sans intercalation d'une résistance.

L'électricité, ayant fait ses preuves sur de petites distances, fut admise, non sans quelques résistances dans les débuts, à pénétrer plus avant dans le domaine

de la traction, et elle commença à s'installer sur des lignes de grande longueur. Elle joua d'abord timidement le rôle modeste, mais utile, d'agent intermédiaire ; ainsi dans la locomotive Heilmann, dont on a beaucoup parlé il y a quelques années, les roues sont actionnées par des moteurs électriques qui empruntent leur énergie à la machine à vapeur de la locomotive, et, dans beaucoup d'automobiles, on retrouve aujourd'hui un système analogue, la voiture portant un groupe électrogène, actionné par un moteur à pétrole.

Mais on fut rapidement amené à se demander si, dans dès cas où l'emploi de la locomotive à vapeur a de sérieux inconvénients, pour les lignes établies en souterrain par exemple, il ne serait pas possible d'utiliser un courant amené le long de la voie, et l'on adopta naturellement, dans les premières installations, le système qui avait si bien réussi pour les tramways. Toutefois, quand il s'agit de remorquer un train sur une distance un peu plus longue, il faut disposer d'une quantité d'énergie beaucoup plus considérable, et, pour que la solution soit bonne au point de vue économique, on doit nécessairement s'adresser à de hautes tensions.

Ces tensions élevées étant très difficiles à utiliser directement, l'on dut avoir recours au procédé des sous-stations. Dans presque toutes les installations, qui datent déjà de quelques années, l'énergie est transmise à ces sous-stations au moyen de courants alternatifs simples ou triphasés à haute tension ; là, des transformateurs abaissent le voltage et des commutatrices fournissent du continu qui est ensuite

envoyé dans un rail, placé parallèlement aux deux rails de la voie et très soigneusement isolé : De larges frotteurs à ressort recueillent le courant très intense que peut amener ce gros conducteur et qu'un fil d'alimentation ordinaire aurait été incapable de conduire.

Mais les frais d'installation et d'exploitation de ces sous-stations, qui comportent des machines constamment en rotation, et qui demandent, par là même, une active surveillance, deviennent très considérables dès que la ligne est un peu étendue et le problème s'est posé naturellement d'arriver à transmettre directement le courant à haute tension aux trains en marche.

Dès 1893, on vit fonctionner à Lugano, puis à Évian, des voitures actionnées par du triphasé ; mais ce n'est qu'à partir de 1902 que le système entra véritablement dans la pratique courante et il est actuellement employé avec succès sur la ligne de la Valteline et au tunnel du Simplon.

Il semblait, dans le principe, bien hardi de vouloir recueillir avec des archets frottant sur les fils de ligne la puissance considérable qui est nécessaire pour remorquer tout un train : ce sont les célèbres expériences effectuées sur la ligne militaire de Berlin à Zossen qui ont démontré que la solution n'est pas impossible. Dans ces essais, chaque voiture automotrice recevait un courant à 10.000 volts, transformé sur la voiture elle-même en courant à 3.000 volts qui actionnait directement les moteurs triphasés entraînant les essieux ; on sait que l'on a atteint ainsi la prodigieuse vitesse de 200 kilo-

mètres à l'heure ; pour marcher à cette allure, il faut une puissance énorme, ne fut-ce que pour vaincre la résistance de l'air qui exerce à l'avant de la voiture une pression de près de 200 atmosphères.

Le système triphasé a d'incontestables avantages, il semble particulièrement convenir pour les lignes de montagne à cause de la facilité avec laquelle les moteurs peuvent fonctionner comme génératrices et servir, dans les descentes, à récupérer de l'énergie ; mais il a ses inconvénients, il exige deux fils de ligne, il demande, pour que l'on puisse obtenir un bon facteur de puissance, l'emploi de moteurs à faible entrefer et par suite, d'une construction assez délicate ; d'autre part, ces moteurs ont des vitesses presque invariables, et il faut combiner des dispositifs assez compliqués pour arriver à faire changer la vitesse.

Aussi, depuis deux ou trois ans, on peut observer une tendance assez marquée pour équiper les lignes de traction avec le système monophasé ; l'invention des nouveaux moteurs à courant alternatif simple, dont nous avons parlé, a rendu ce système pratique.

La première installation de ce genre a été faite en Amérique et l'on en trouve maintenant d'assez nombreux exemples, en Allemagne et en Belgique, qui fonctionnent d'une manière très satisfaisante. Un seul fil est nécessaire puisque le retour peut se faire par la terre ; dans certains cas cependant, le retour par un deuxième fil est rendu obligatoire par les règlements. L'énergie peut être transmise sous une tension très élevée et l'on peut user de la distribution par transformateurs statiques ordinaires.

Ces moteurs ont une vitesse facilement réglable sans perte d'énergie, et ont, nous l'avons vu, le grand avantage de pouvoir être alimentés, le cas échéant, par des courants continus, ce qui permet aux voitures des lignes interurbaines à courant alternatif de pénétrer jusqu'au centre des villes par les voies urbaines à courant continu.

Ce système, qui paraît plein d'avenir, n'est évidemment qu'à ses débuts ; certaines imperfections devront être corrigées, il conviendra en particulier, pour qu'il puisse prendre place dans la traction des trains lourds, que l'on parvienne à établir des moteurs capables de fonctionner sous des voltages plus élevés que les moteurs actuels.

En même temps que le courant alternatif simple rentrait ainsi en faveur, le courant continu, grâce à des perfectionnements permettant l'emploi des hautes tensions, reprenait aux yeux de ses partisans la supériorité qu'il semblait avoir perdue. En 1903, M. Thury a établi en France la ligne de Saint-Georges de Commiers à La Mure où un courant de 2.400 volts est amené par des archets à quatre moteurs en série ; deux fils et les rails de roulement constituent une distribution à deux ponts. Depuis lors, d'autres lignes, à Cologne, à Sainte-Marie-aux-Chênes, à Bellinzona, sont équipées d'une façon analogue.

Dans plusieurs de ces installations, quelle que soit d'ailleurs la nature du courant adopté, on a commencé à substituer aux trains remorqués par une locomotive unique un ensemble de voitures toutes automotrices. Les avantages de cette substitution sont multiples et évidents ; on augmente, par ce

moyen, l'adhérence utile, on diminue considérablement le poids à entraîner et l'on divise la puissance totale nécessaire entre plusieurs moteurs qui seront plus faciles à régler qu'un moteur unique trop puissant et dangereux.

Il est indispensable que le réglage se fasse pour chaque unité d'une façon tout à fait semblable ; on est arrivé à installer des contrôleurs qui commandent des relais placés sur chaque voiture et qui fonctionnent assez simplement ; ces contrôleurs, n'agissant plus directement sur le courant principal, peuvent n'avoir que des dimensions restreintes et l'on ne peut s'empêcher d'admirer qu'une si grande puissance puisse être réglée et distribuée par des appareils si peu encombrants.

Ainsi, grâce aux progrès de l'électricité, les moyens de transport, que l'invention de la machine à vapeur avaient déjà si profondément modifiés, semblent entrer dans une nouvelle phase d'active évolution ; ce n'est plus seulement dans des cas particuliers, comme celui des communications urbaines ou des chemins de fer établis en tunnel, que la traction électrique se substitue à la traction à vapeur, le problème de l'électrification des voies ferrées se pose aujourd'hui dans toute son ampleur.

Le gouvernement Suédois fait des expériences très détaillées avec du courant monophasé en vue d'alimenter tous ses réseaux avec de l'énergie électrique produite au moyen des 100,000 chevaux disponibles dans les chutes d'eau du pays ; en Suisse, en Italie, des projets analogues sont à l'étude.

Dès à présent, dans les régions où existent des forces hydrauliques, il peut y avoir économie à renoncer à la vapeur, mais on peut même prévoir qu'en beaucoup de circonstances, il sera avantageux de produire, même avec du charbon, dans une usine centrale de très grande puissance, l'énergie distribuée aux nombreux trains qui sillonnent les voies ferrées, au lieu de l'obtenir, par fragments, dans des locomotives d'un rendement médiocre, d'un poids énorme, d'un maniement difficile, encombrantes d'ailleurs, consommant de la vapeur en pure perte pendant les arrêts, salissant et détériorant le matériel par leurs noires fumées.

CHAPITRE VII

Énergie chimique et Énergie électrique

---

§ I. — LA PILE ÉLECTRIQUE ET LA THERMODYNAMIQUE

Les admirables progrès des machines d'induction ont relégué les piles électriques, exception faite bien entendu pour les accumulateurs, au rang d'appareils, utiles peut-être pour quelques modestes applications domestiques, mais tout à fait impropres aux usages de la grande industrie. On commettrait cependant une grave erreur si l'on croyait que ce séculaire générateur d'électricité a perdu, pour toujours, tout intérêt pratique.

En réalité la pile apparaît, au contraire, comme le plus merveilleux transformateur d'énergie que nous connaissions ; grâce à la découverte immortelle de Volta, nous pouvons directement transformer l'énergie chimique en énergie électrique et, quand on se sait en possession d'un tel moyen, on ne peut s'empêcher de considérer comme bien barbares les procédés que nous employons aujourd'hui pour produire le courant. N'est-il pas singulièrement maladroit de

dégrader d'abord l'énergie chimique, de la laisser tomber sous forme de chaleur, puis de transformer en travail la modeste partie que le principe de Carnot nous permet de recueillir sous forme d'énergie mécanique, puis enfin, par une dernière transformation, d'utiliser ce travail pour obtenir l'électricité.

Malheureusement, si, dans cette comparaison entre les deux méthodes qui peuvent être employées lorsque l'on désire avoir un courant, l'avantage reste théoriquement à la pile, des raisons économiques interviennent qui renversent les résultats définitifs. La pile utilise admirablement le combustible qu'on lui confie, mais ce combustible est généralement du zinc et le zinc coûte vingt fois plus que le charbon; d'autre part, les acides que l'on doit employer sont évidemment plus dispendieux que l'oxygène de l'air qui, dans les foyers de nos machines à vapeur, vient se combiner au charbon.

Mais il faut bien comprendre que ces raisons contingentes peuvent perdre demain toute valeur; rien, au point de vue théorique, ne s'oppose à ce que l'on découvre une pile qui transformerait directement, en énergie électrique, l'énergie chimique du charbon et de l'oxygène. Le jour où un heureux physicien ferait cette découverte sensationnelle, la machine à vapeur serait condamnée à une rapide disparition.

De nombreuses tentatives ont été faites pour résoudre ce passionnant problème, quelques-unes ont donné, tout au moins, des espoirs de réussite; ainsi Jablochkoff, en plongeant du charbon dans des azotates en fusion, a obtenu, il y a longtemps déjà, des éléments de pile où le carbone était bien le corps

attaqué et, depuis lors, beaucoup d'autres combinaisons ont été essayées qui ne manquent pas de quelque intérêt. Il ne paraît pas cependant utile de rappeler ici toute cette longue série d'expériences qui, en somme, n'ont pas encore abouti ; peut-être est-il préférable d'indiquer plutôt comment, dans les idées actuelles, l'on comprend le fonctionnement des piles.

Quoique plus de cent ans se soient écoulés depuis l'invention de cet admirable instrument, il suscite aujourd'hui encore des discussions pareilles à celles dont l'histoire scientifique du commencement du siècle dernier a conservé la mémoire et, sans chercher à donner un historique détaillé de toutes les théories qui ont été proposées, je voudrais tâcher de bien marquer les points qui doivent être considérés comme définitivement acquis et indiquer ceux sur lesquels au contraire il paraît désirable de projeter un peu plus de lumière.

Continuant à suivre l'ordre logique auquel nous nous sommes attachés, supposons que le physicien, en possession des connaissances sur l'électricité que nous nous sommes efforcés d'exposer jusqu'ici, se trouve subitement en face d'une expérience semblable à celle de Volta. Le premier point qui attirerait certainement son attention serait que la pile fournit de l'énergie, et il lui paraîtrait naturel de chercher tout d'abord quelle est l'origine de cette énergie.

Comme il apercevrait sans doute rapidement la réaction chimique, dont la pile est le siège pendant le passage du courant, il serait conduit à se demander

si la force électromotrice de la pile qu'on définit, indépendamment de la différence de potentiel électrostatique, comme égale à l'énergie communiquée par ce générateur à l'unité de quantité d'électricité qui le traverse, ne serait pas précisément l'équivalent de l'énergie mise en liberté dans le phénomène chimique qui produit le passage de cette électricité.

Cette question, plusieurs physiciens se la sont posée il y a longtemps déjà : Ed. Becquerel le premier, puis Helmholtz dans son immortel opuscule « sur la conservation de la force », puis Lord Kelvin qui précisa, pour la première fois, nettement les termes du problème, le résolut par l'affirmative et donna la formule qui permet de calculer la force électromotrice d'un élément, considérée comme proportionnelle à la somme algébrique des énergies chimiques perdues dans les réactions qui se produisent dans la pile lorsqu'elle est traversée par l'unité d'électricité.

Au point de vue expérimental, les recherches de Favre resteront classiques ; il montra le premier, en 1858, que, contrairement à la formule de Thomson, la chaleur chimique, c'est-à-dire la chaleur qui se serait dégagée librement dans les réactions chimiques dont la pile est le siège et qui mesure la perte d'énergie des corps qui la constituent, n'est pas nécessairement égale à la chaleur voltaïque, c'est-à-dire à l'énergie électrique produite, mesurée tout entière sous forme de chaleur. Mais ni Favre, ni M. Raoult, qui avaient constaté le même fait, ne crurent ou n'osèrent exprimer nettement cette pensée que la différence entre ces deux chaleurs était un

fait réellement irréductible et ils s'ingénièrent à chercher des réactions parasites capables d'expliquer la différence. Ce fut Edlund qui montra le premier qu'il y avait là une anomalie certaine; mais il ne l'expliqua pas davantage.

Ainsi donc, après les travaux de ces éminents physiciens, il était acquis expérimentalement que l'énergie chimique n'est pas nécessairement égale à l'énergie électrique, mais le fait restait mystérieux. Le principe de la conservation de l'énergie n'était pas d'ailleurs mis en défaut, car, suivant que la différence entre les deux énergies était positive ou négative, on constatait que la pile s'échauffait ou se refroidissait en fonctionnant.

Il peut nous paraître aujourd'hui naturel, pour aller plus loin, de nous adresser au principe de Carnot-Clausius; sa généralité n'est plus contestée; il apparaît comme un principe fondamental de la théorie de l'Énergétique. Mais une telle idée devait sembler de prime abord fort hasardée. Il y a une trentaine d'années, on n'appliquait volontiers ce principe qu'au cas particulier d'un moteur thermique et encore d'un moteur qui suivrait un cycle tout particulier de transformations. Aussi, ce ne fut tout d'abord qu'assez timidement que des tentatives furent faites dans ce sens et longtemps encore les physiciens les plus éminents conservèrent-ils quelques doutes sur la légitimité des raisonnements fondés sur cette application.

C'est certainement à Gibbs que reviendra l'immortel honneur d'avoir étendu le domaine de la

thermodynamique et fait entrer dans ce domaine les riches régions où se produisent les phénomènes physiques et électrochimiques. Dans un chapitre de son célèbre mémoire « sur l'équilibre des substances hétérogènes » intitulé : *Modifications des conditions d'équilibre par la force électromotrice*, et dans la seconde partie intitulée : *Propriétés d'un appareil électrochimique parfait*, il fait franchement, à la pile, l'application du principe de Carnot ; il remarque explicitement qu'on néglige à tort la variation d'entropie qui peut se produire par suite d'autres dégagements de chaleur s'effectuant dans une pile réversible maintenue à température constante alors que l'effet Joule est supposé réduit à zéro, et il arrive ainsi à interpréter les faits connus ; mais le Mémoire de Gibbs; peu répandu, n'aurait pas eu, peut-être, l'influence qn'il a prise depuis sur le développement de la science si, de son côté, et indépendamment, von Helmholtz n'avait abordé la même question, à la même époque, et n'avait ensuite publié ses Mémoires, aujourd'hui classiques, sur la thermodynamiqne des phénomènes chimiques,

Il traite d'abord le cas simple d'un élément de pile formé par deux électrodes de même substance plongeant dans deux dissolutions inégalement concentrées d'un même électrolyte. L'effet du courant est alors un simple transport du métal et un changement de concentration ; on peut, la quantité d'eau restant la même, ramener la concentration à la même valeur initiale par un phénomène de condensation ou de vaporisation réversible ; quant aux autres phénomènes irréversibles, tels que l'effet Joule ou la

diffusion, ils peuvent être rendus aussi petits que l'on voudra, et, dès lors, on se trouve en présence de phénomènes auxquels l'application immédiate du principe de Carnot-Clausius apparaîtra comme tout à fait vraisemblable ; on écrira seulement, en effet, qu'il ne peut y avoir, la température restant la même, de chaleur transformée en travail ni de travail transformé en chaleur par l'intermédiaire de phénomènes réversibles ; on déduit facilement de là que la force électromotrice est égale au travail nécessaire pour maintenir la concentration constante, travail qui ne dépend que de la force élastique de la vapeur émise par ces dissolutions, et l'on arrive ainsi facilement à une formule qui lie la force électromotrice de l'élément à la force élastique de la vapeur des dissolutions.

Von Helmholtz a été plus loin : en appliquant à un élément quelconque le second principe de la thermodynamique, il établit une relation, aujourd'hui classique, qui lie la différence entre la chaleur chimique et la chaleur voltaïque à la variation de la force électromotrice de l'élément avec la température. Si cette variation est nulle, les deux chaleurs ont la même valeur.

Mais on peut envisager la chose à un point de vue très géneral, et c'est, en réalité, ce qu'a fait von Hemholtz ; il montre comment une extension naturelle des principes de la thermodynamique amène à considérer l'énergie que possède un système de corps comme constituée par deux parties, l'une libre, capable, par suite, de subir toutes les transformations et particulièrement de se transformer en tra-

vail extérieur, l'autre, au contraire, liée et ne se manifestant que par un dégagement de chaleur; or l'énergie électrique est de même espèce que l'énergie mécanique, ces deux variétés se transforment intégralement l'une dans l'autre; c'est de l'énergie libre. Quant à l'énergie chimique, d'ordinaire lorsque nous la dégageons, nous la laissons tomber sous la forme calorifique, et c'est ainsi que nous la mesurons. Mais elle renferme, en réalité, deux parties, une partie qui est de l'énergie liée et une autre qui est l'énergie libre directement transformable en énergie électrique.

C'est cette partie qui préside aux réactions chimiques, et c'est elle seule qui est l'équivalent de la force électromotrice.

Il arrive souvent, d'ailleurs, que l'énergie libre est très voisine de l'énergie totale; M. Lippmann a montré dans quelles conditions l'égalité exacte pouvait être obtenue; il peut même arriver que l'énergie liée soit négative et, par suite, que la chaleur voltaïque soit supérieure à la chaleur chimique. Dans tous les cas, la règle générale reste la même : l'énergie voltaïque équivaut à l'énergie libre que fourniraient les réactions chimiques si elles se produisaient sans courant, et, par suite, l'excès de la chaleur chimique sur la chaleur voltaïque équivaut à l'énergie liée qui accompagne la réaction. Cette manière de voir conduit aisément aux formules que nous avons déjà signalées; mais la restriction est tombée, le raisonnement s'applique à des piles irréversibles.

Une idée capitale ressort, d'ailleurs, de la concep-

tion de von Helmholtz: le classement des énergies suivant leur degré, et, si cette idée est juste, ses conséquences doivent être générales et se retrouver dans n'importe quel élément.

La haute importance de la théorie de von Helmholtz a conduit divers auteurs à tâcher de la vérifier. Après de nombreuses expériences de M. J. Mozer, de M. Czapski et de M. Gockel, on doit citer celles de M. Jahn, qui ont fourni des résultats expérimentaux en très bon accord avec ceux que permet de calculer la formule.

Un fait très important a été mis en évidence par M. Duhem, qui, d'ailleurs, fut l'un des premiers à adopter et à préciser les résultats généraux de Gibbs et de Helmholtz. M. Duhem démontra que la force électromotrice d'un élément varie avec la pression, et il établit la formule, vérifiée depuis par M. Gilbault, qui fait connaître cette variation.

Il existe des éléments où la conductibilité de l'électrolyte est obtenue non par la dissolution mais par la fusion, et l'on ne saurait affirmer *a priori* que de tels éléments soient entièrement comparables aux éléments ordinaires; si l'on adopte, par exemple, la conception de la dissociation électrolytique, il n'est point évident que la fusion produise une dissociation analogue à celle à laquelle la dissolution peut donner naissance. La chaleur joue ici un rôle tout spécial, puisque, sans l'élévation de température nécessaire à la fusion l'élément n'existerait pas ; il y a un intérêt évident à rechercher si, dans les couples pyro-électriques, tout se passe comme dans les piles hydro-

électriques. J'ai le premier, je crois, considéré à ce point de vue les éléments pyro-électriques et tenté cette vérification ; à cet effet, j'ai étudié divers couples formés par des électrolytes fondus, et j'ai pu vérifier la relation de von Helmholtz sur quelques éléments. Depuis, un certain nombre de physiciens ont également étudié des piles semblables, M. Brown par exemple et plus récemment, dans un travail très soigné, M. Vincenzo Buscemi est arrivé à des résultats qui sont en parfait accord avec ceux que j'avais obtenus.

Toutes ces vérifications, faites dans des conditions si diverses, sont concluantes : on doit considérer la relation établie par von Helmholtz comme définitivement acquise, et, sans doute, on légitime ainsi *a posteriori* l'extension donnée au principe de Carnot.

§ 2. — LE MÉCANISME DE LA PRODUCTION DE LA FORCE ÉLECTROMOTRICE

Les résultats que nous fournit la Thermodynamique sont très généraux ; ils nous donnent une vue synthétique des phénomènes qui se produisent dans la pile ; mais, ne supposant rien sur la nature intime des choses, ils ne nous apportent aucun renseignement sur le mécanisme qui produit le courant. Et cependant notre curiosité est plus exigeante : les physiciens, même les plus timides, qui n'aborderaient pas sans scrupules, dans un cas pourtant plus simple tel que celui des courants induits, des questions analogues et qui se contentent alors, pour tout explication, des résultats fournis par l'application

des principes de l'énergétique, veulent ici davantage.

Dans les phénomènes de l'électrolyse, on aperçoit des faits matériels, des transports de matières, des réactions chimiques et, en même temps, faisant partie du même ensemble, des courants électriques; n'est-il pas tentant d'expliquer les uns par les autres? La sagesse conseillerait peut-être la prudence; alors que nous savons mal concevoir ce que peut être un courant qui traverse un fil sans la complication de modifications matérielles, n'est-il pas bien téméraire de prétendre savoir ce qui se produit dans un ensemble plus complexe? Mais si la Science n'écoutait que la voix de la prudence, elle n'avancerait guère; les hardis conquérants qui ont enrichi son domaine ont toujours été des audacieux.

Si donc on veut pénétrer ici plus avant, il faut s'appuyer sur des hypothèses qui paraîtront toujours nécessairement un peu hasardées, parce qu'elles n'auront pas de vérifications immédiatement possibles; mais ne seront-elles pas légitimes si elles fournissent une interprétation symbolique commode de tous les faits connus, et ne seront-elles pas très heureuses si elles amènent à des découvertes nouvelles?

M. Nernst a pensé que les théories nouvelles de l'électrolyse, qui expliquaient ou, si l'on aime mieux, permettaient de grouper tant de faits connus, devaient aussi fournir l'explication de la manière dont se produit une force électromotrice.

L'illustre physicien appliqua, d'abord, aux piles constituées par un même métal, plongeant dans le

même électrolyte différemment concentré, les idées de M. Van't Hoff sur la pression osmotique. Mais, pour interpréter les phénomènes qui se produisent dans les piles ordinaires, il faut une nouvelle hypothèse : c'est l'idée si hardie mais si féconde, de la pression de dissolution des métaux en contact avec des liquides (Lösungsdruck).

On sait comment, partant de cette idée [1], M. Nernst est parvenu à calculer la valeur des différences de potentiel au contact des électrodes et des électrolytes et à déduire, de là, la valeur de la force électromotrice d'un élément de pile en fonction des pressions osmotiques, ou, si l'on préfère, des concentrations.

On peut certainement considérer les hypothèses de M. Nernst comme très hardies, mais on ne saurait contester ni leur originalité ni leur puissance. Sont-elles, d'ailleurs, plus singulières que celles que l'on est obligé d'admettre partout où l'on fait des raisonnements qui supposent la connaissance des molécules et des actions moléculaires ? On pourrait, par exemple, comparer la théorie de M. Nernst aux théories de la capillarité qui, comme celles de Laplace, pénètrent dans le mécanisme même des actions moléculaires, tandis que la théorie de von Helmholtz serait analogue à celle par laquelle Gauss donne, des mêmes phénomènes, par une application du principe des vitesses virtuelles, une théorie synthétique ; niera-t-on que la théorie de Laplace ait rendu de grands services ?

1. J'ai exposé cette théorie dans mon livre : *la Physique moderne*, p. 157.

On ne peut que signaler ici les intéressants travaux de M. Leblanc, qui considère que chaque ion retient la charge qui lui est propre, en vertu d'une certaine réaction mesurable en volts et qu'il désigne sous le nom d'intensité d'adhérence (Haftintenzitäd), et aussi les Mémoires où M. Riecke a, dans ces dernières années, développé une théorie se rattachant à des idées analogues.

De même qu'il a été fait pour la théorie d'Helmholtz, il paraîtrait désirable de vérifier si les idées qui viennent d'être exposées paraissent applicables aux éléments pyro-électriques. Il semble, en effet, qu'une interprétation satisfaisante du mécanisme par lequel l'énergie chimique fournit de l'énergie électrique doit aussi bien s'appliquer aux éléments pyro-électriques qu'aux éléments hydro-électriques, puisque, dans les uns comme dans les autres, la transformation d'énergie obéit, comme nous l'avons prouvé, aux mêmes lois.

Peu de choses ont été faites dans cette direction; j'ai cependant montré, dès 1890, qu'il existe des courants analogues à ceux que produisent les différences de concentration et que l'on obtient en faisant plonger, par exemple, deux électrodes d'argent dans deux mélanges fondus d'azotate d'argent et d'azotate de sodium, de proportions différentes. Et, sans doute, il n'est pas impossible d'admettre ici que la chaleur produit une dissociation analogue à la dissociation électrolytique; ayant constaté que la polarisation maxima d'électrodes d'argent, de fer ou d'or dans les azotates ou les chlorates alcalins tend vers zéro quand la température tend vers la

décomposition de l'électrolyte, j'émettais cette idée que, par l'élévation de température, un azotate tel que l'azotate de sodium tend sans doute à se décomposer spontanément en donnant les deux ions sodium et radical azoté, et que, sans doute aussi, on pouvait étendre aux électrolytes fondus des hypothèses analogues à celle que M. Arrhénius venait alors d'imaginer pour le cas des dissolutions.

La thermodynamique nous a appris à connaître l'origine de la force électromotrice ; des hypothèses comme celles de MM. Arrhénius et Nernst nous font concevoir le mécanisme par lequel se produit cette force électromotrice ; une dernière question se pose : où est le siège de cette force électromotrice ?

Il importe, tout d'abord, de bien comprendre la signification de la question ; elle pourrait, en général, ne pas présenter de sens déterminé. Dans le cas d'un générateur fondé sur les phénomènes d'induction, un anneau Gramme si l'on veut, en aucun endroit on ne pourra dire : là est le siège de la force électromotrice produite. Dans les électrolytes, on peut parfaitement développer de telles forces électromotrices induites : on pourrait fort bien imaginer *a priori*, sans absurdité, qu'il en va de même dans la transformation de l'énergie chimique en énergie électrique, et qu'aucune localisation particulière ne peut être assignée à la force électromotrice.

L'expérience, toutefois, semble prouver que la pile se comporte autrement.

Il apparaît, en effet, comme résultat de démons-

trations expérimentales, qu'il existe une différence de potentiel électrostatique entre les deux pôles d'une pile en circuit ouvert; tout au plus pourrait-on faire quelques réserves sur les expériences où l'on ne parvient à mettre en évidence cette différence de potentiel qu'à l'aide d'un condensateur ayant exigé un certain courant de charge et demandant peut-être un courant permanent pour réparer constamment la déperdition. Si on laisse de côté cette objection, on sera obligé d'admettre que, chacun des conducteurs homogènes qui constituent la pile devant avoir un potentiel constant, il existe des différences de potentiel aux contacts successifs et que la force électromotrice de la pile est mesurée, en joules par coulomb, par le même nombre que celui qui mesure la somme algébrique de ces différences de potentiel en volts.

Dès lors, le problème se pose de déterminer si, à chacun des contacts, existe une telle différence et quelle elle est. C'est le problème posé par Volta, si souvent discuté, et qui est un peu trop spécial pour pouvoir être discuté ici dans les détails.

Nous ferons seulement remarquer que l'idée de Volta, qui attribuait uniquement la différence de potentiel au contact des métaux, est sûrement inexacte, puisqu'il existe des piles où les électrodes sont de même métal[1], mais rien n'empêche de sup-

1. Il est, au point de vue historique, intéressant de rappeler que cet argument a été donné pour la première fois, en 1843, par le prince Louis-Napoléon (Napoléon III), alors qu'il était interné au fort de Ham (*Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* t. XVI : Examen de la théorie physique et de la théorie

poser que, dans les piles ordinaires, il vient s'ajouter aux autres différences de potentiel au contact celle qui se produit au contact des métaux et que les expériences classiques de Lord Kelvin et les remarquables recherches de M. Pellat semblent bien avoir mis en évidence.

La théorie thermodynamique ne nous fournit, à cet égard, aucun renseignement; elle donne, en effet, la force électromotrice dans son ensemble, quelle que soit sa nature et quel que soit son siège. La théorie de M. Nernst, exposée en suivant les voies indiquées par l'éminent physicien, conduit, au contraire, à attribuer la différence de potentiel aux surfaces où se produisent des échanges d'ions, et elle fournit même, *a priori*, la valeur de ces différences. Mais, au point de vue expérimental, la vérification est difficile, sinon impossible; la plupart des expériences ne donnent, en effet, qu'une somme et, comme l'a montré M. Couette, il paraît bien que, dans la plupart des expériences au moins, les vérifications ne portent que sur les cas où les conclusions de la théorie se confondent avec celles de la théorie thermodynamique.

purement chimique de la pile voltaïque, p. 1098 et 1180) : « Je construisis, dit-il, deux couples suivant le principe des piles à courant constant de Daniell, mais avec un seul métal; je plongeai un cylindre de cuivre dans un liquide composé d'eau et d'acide nitrique, le tout contenu dans un tube de terre poreuse, et j'entourai ce tube dans un autre cylindre de cuivre plongeant dans de l'eau acidulée avec de l'acide sulfurique, etc. », et il tirait cette conclusion : « que, dans la pile, la cause de l'électricité est purement chimique, puisque deux métaux ne sont pas nécessaires pour produire un courant ».

Les remarques qui précèdent nous amènent à quelques conclusions.

La théorie thermodynamique paraît aujourd'hui inébranlablement établie; elle repose sur des principes que l'on ne pourrait contester sans ébranler tout l'édifice qui semble avoir été le plus solidement construit en ce siècle. Cette théorie, justifiée par l'expérience, est l'une des plus curieuses et des plus intéressantes illustrations de ces principes eux-mêmes; généralisée, comme elle l'a été depuis Helmholtz, elle peut nous fournir des relations remarquables entre la force électromotrice d'un élément et d'autres grandeurs physiques, mais elle ne saurait nous renseigner ni sur le mécanisme de la production, ni sur le siège de la force électromotrice.

Il serait imprudent de chercher à prévoir le sort que l'avenir réserve aux théories qui reposent, comme celles de M. Arrhénius, de M. Ostwald et de M. Nernst, sur les hypothèses relatives à la constitution de la matière. Elles sont évidemment liées à ces conceptions, mais elles fournissent des relations qui sont parfois indépendantes des hypothèses elles-mêmes et elles constituent certainement le meilleur moyen de rattacher les uns aux autres des faits nombreux et importants qui étaient épars jusque-là. Elles ont suggéré, d'ailleurs, et suggèrent encore tous les jours, des travaux de premier ordre; à ce point de vue, le service qu'elles ont rendu est incontestable et il n'est certainement pas exagéré de dire qu'elles seront comptées, dans l'histoire de la science, parmi les plus ingénieuses et les plus fécondes qui aient jamais été imaginées.

§ 3. — LES ACCUMULATEURS

Si les piles ne sont presque plus utilisées, les piles secondaires ou accumulateurs occupent, au contraire, une place considérable dans l'industrie moderne.

Avec un accumulateur, on transforme en énergie potentielle, emmagasinée sous forme d'énergie chimique, l'énergie électrique d'un courant continu, et, au moment voulu, l'appareil restitue la presque totalité de l'énergie électrique primitive.

Dans la première partie de l'opération, dans la charge, l'accumulateur fonctionne comme récepteur, les deux plaques, mises en relation avec les bornes d'une dynamo, se polarisent, par suite des phénomènes d'électrolyse qui se produisent dans le liquide conducteur où elles sont plongées, une force électromotrice apparaît qui s'oppose au passage du courant, et, ainsi, de l'énergie électrique est consommée.

Si, rompant la communication avec la dynamo, on réunit les deux plaques par un circuit conducteur, un courant se produit de sens contraire au premier; c'est la seconde phase, celle où l'appareil débite en se déchargeant, et, petit à petit, les réactions chimiques dont il est le siège ramènent toutes choses à l'état primitif.

Il est à peine besoin de faire remarquer que dan un accumulateur, c'est de l'énergie et non de l'électricité qui s'accumule: alors qu'on le charge, tout

l'électricité qui y entre en sort intégralement; l'accumulateur est, en somme, une pile que l'on peut régénérer par le passage d'un courant, il constitue, à vrai dire, un couple réversible.

Pour qu'un tel dispositif puisse rendre de véritables services, il faut que la capacité d'un élément, c'est-à-dire la quantité d'électricité qu'il peut pratiquement fournir à la décharge, soit assez considérable et que le rendement ne soit pas mauvais, c'est-à-dire que l'on retrouve la plus grande partie de l'énergie dépensée.

L'accumulateur au plomb est encore, à l'heure présente, presque le seul qui soit employé; il faudrait remonter jusqu'à l'année 1803 pour trouver l'origine des piles secondaires et, dès cette époque, Ritter avait remarqué que l'on obtenait des effets particulièrement marqués avec le plomb; mais, jusqu'aux travaux de Planté, l'expérience de Ritter resta comme une simple curiosité qui ne semblait devoir conduire à aucune application.

On sait comment après l'invention de Planté, les recherches de Montaud, Kabath, Regnier, Faure et de tant d'autres électriciens ont conduit aux types actuels qui diffèrent par quelques détails les uns des autres, mais où l'on retrouve toujours les mêmes parties essentielles.

Dans le système Planté, les plaques sont formées d'un support qui, à la suite d'un grand nombre de charges et de décharges successives, se recouvre du côté de la plaque que l'on peut appeler positive — puisqu'elle formait l'électrode positive pendant la charge et qu'elle devient le pôle positif perdant la

décharge — d'une très mince couche de peroxyde et, du côté négatif, devient du plomb pur plus poreux que le métal primitif.

Les plaques, genre Faure, sont constituées par une carcasse en alliage inoxydable de plomb et d'antimoine qui est divisée en alvéoles où se trouvent agglomérées des pastilles renfermant la matière active formée d'oxyde de plomb et d'un agglutinant convenable.

Les nombreux travaux qui, dans ces dernières années, ont été faits sur les accumulateurs ont confirmé une interprétation que l'on avait, dès le début, donné des phénomènes chimiques qui s'y produisent. Le plomb, l'acide sulfurique, le bioxyde de plomb se transforment en un système formé de sulfate de plomb qui recouvre les deux électrodes et d'eau. La réaction, qui est ordinairement réversible, se produit, quand l'élément débite du courant, en sens inverse. Mais l'application de la théorie des ions a permis de décomposer, en quelque sorte, le phénomène global et l'on connait bien aujourd'hui la composition exacte des deux électrodes et de l'électrolyte à toutes les phases de la charge ou de la décharge. M. Jumau a, en particulier, très bien résumé dans son excellent livre « *les Accumulateurs électriques* » l'état de cette question qu'il a contribué par ses travaux personnels à éclaircir.

On a également appliqué à l'accumulateur la théorie thermodynamique et la théorie osmotique; ces théories ont fourni de précieux renseignements, elles font connaître en particulier l'influence de la concentration sur la valeur de la force électromotrice.

Grâce à tant d'efforts, les accumulateurs au plomb ont atteint un haut degré de perfection.

On a obtenu aujourd'hui des modèles qui peuvent emmagasiner de 40 à 50 watts-heure par kilogramme total d'élément; le rendement, en quantité, atteint jusqu'à 95 pour 100; le rendement, en énergie, est sensiblement plus faible puisque la charge se fait toujours sous un potentiel plus élevé que la décharge: en pratique il est de 70 pour 100.

Les accumulateurs sont des appareils délicats qui doivent être maniés avec précaution; il convient, dans la charge comme dans la décharge, de ne pas dépasser une certaine valeur des courants; l'oubli des recommandations que ne manquent pas de faire les constructeurs entraîne une rapide détérioration; les plaques positives, où se produisent des foisonnements trop actifs, tombent en poussière, leur durée est d'ailleurs toujours beaucoup plus courte que celle des négatives.

Pour charger une batterie, on peut employer deux procédés différents; ou bien on la mettra en relation avec une dynamo dont on maintiendra l'intensité constante, et dont il faudra, par suite, faire varier l'excitation, car la force contre-électromotrice augmente au fur et à mesure que croît la charge; ou bien, l'on conservera, pendant toute l'opération, une différence de potentiel constamment égale à la valeur maxima que doit prendre la force contre-électromotrice à la fin de la charge et c'est alors le débit qui devra varier.

La seconde méthode est beaucoup plus rationnelle que la première; elle donne, à temps de charge égal,

un meilleur rendement, elle assure aux plaques une vie plus longue et, si on le désire, elle permet de recharger les accumulateurs beaucoup plus rapidement.

Utilisée avec les ménagements nécessaires, une batterie fournit des résultats très réguliers et très satisfaisants ; néanmoins les éléments au plomb conservent quelques défauts qui tiennent à leur principe même et que ne saurait supprimer l'habileté des constructeurs.

Le manque d'homogénéité des plaques entraîne divers inconvénients : des couples locaux peuvent s'établir, des phénomènes thermoélectriques vont se produire aux soudures, des effets Peltier sont à craindre ; la subtitution des oxydes au métal est fort avantageuse, au point de vue de l'augmentation de la capacité, mais les oxydes ne sont pas très bons conducteurs de l'électricité, et, à cet égard, sont inférieurs au métal ; ce sont ces raisons qui expliquent la différence assez forte entre le rendement en quantité et le rendement en énergie : une partie très notable de l'énergie se dissipe sous forme de chaleur, tant à la charge qu'à la décharge.

Le défaut que l'on reproche le plus habituellement aux accumulateurs est d'avoir un poids considérable ; il est certainement très fâcheux que le métal, capable de subir les altérations les plus profondes dans la charge et d'emmagasiner ainsi les plus grandes quantités d'énergie, se trouve être précisément le plomb, l'un des corps les plus denses de la chimie. Pour les applications où il est nécessaire de transporter les éléments, ce défaut est

évidemment fort gênant; il n'en faudrait pas toutefois exagérer l'importance.

Pour l'automobilisme, on construit aujourd'hui des batteries qui ne pèsent que 30 p. 100 du poids total de la voiture et qui permettent de parcourir aisément, sans recharge, une centaine de kilomètres à la vitesse de 20 kilomètres à l'heure. Ce résultat est déjà fort remarquable.

Néanmoins, l'invention d'un type différent d'accumulateurs plus légers à capacité égale ou de meilleur rendement a, depuis quelques années, préoccupé un grand nombre de chercheurs. Il serait trop long de faire l'historique de tous les essais qui ont été tentés, et l'on ne peut qu'en indiquer brièvement quelques-uns : ou bien l'on a cherché, en conservant comme électrolyte l'acide sulfurique, de substituer à la carcasse de plomb des métaux tels que le zinc, ou bien l'on s'est adressé à plusieurs combinaisons comprenant, avec divers métaux, des électrolytes variés, chlorures ou solutions alcalines. M. G. Darrieus a songé, le premier, à utiliser des piles secondaires d'un genre particulier où l'électrolyte ne participerait pas aux réactions, et où les deux électrodes seraient seules modifiées par la charge et la décharge. C'est à cette catégorie d'éléments que se rattache l'accumulateur inventé par Edison en 1901 et qui est certainement celui qui a suscité le plus d'espérances.

L'accumulateur Edison est un couple fer, potasse, oxyde de nickel ; les réactions chimiques qui se produisent sont encore assez obscures[1]; mais, dans

1. Dans un remarquable travail M. Jumau a très nettement

l'ensemble, on peut dire que, pendant la charge, le fer s'oxyde et l'oxyde de nickel passe à un degré d'oxydation inférieure, et que, pendant la décharge, le phénomène inverse se produit. La potasse reste invariable et l'on en peut réduire la masse sans inconvénient.

Ces éléments ont une force électromotrice voisine de 1,5 volts, une capacité sensiblement égale à celle de l'accumulateur au plomb, mais un rendement en énergie certainement inférieur. Très récemment Edison a entrepris de nouvelles recherches sur un accumulateur analogue où le cobalt remplacerait le nickel.

On peut citer encore d'autres combinaisons, qui ne sont certes pas au point pour la pratique, mais qui présentent quelque intérêt théorique.

Ainsi MM. Cailletet et Colardeau ont eu l'ingénieuse idée de constituer des piles secondaires sous pression et sont arrivés à réaliser des éléments possédant une capacité énorme.

Sous la pression de 600 atmosphères, on peut atteindre jusqu'à 176 ampère-heures par kilogramme de métal en se servant, comme électrodes, de palladium en mousse.

Malheureusement, cette capacité doit être singulièrement diminuée si on la rapporte au poids total de l'élément qui comprend le réservoir à gaz ; le rendement est d'ailleurs médiocre, et, comme le

posé les questions qui resteraient encore à résoudre au sujet de ces accumulateurs au nickel et il est parvenu, lui-même, à éclaircir quelques points importants.

métaux nobles, non susceptibles de s'altérer chimiquement au contact de l'électrolyte et des produits de sa décomposition, semblent seuls aptes à former des accumulateurs à gaz condensé, dont la capacité augmente avee la pression, le prix des éléments constitués avec de tels métaux, est beaucoup trop élevé pour que cette intéressante expérience puisse conduire à des résultats vraiment utilisables.

On me permettra de rappeler ici que j'ai moi-même étudié une classe particulière d'éléments réversibles qui présentent cette particularité que les électrodes restent entièrement métalliques pendant la charge, comme pendant la décharge, ce qui permet, théoriquement, de rendre les pertes d'énergie aussi petites que l'on voudra. On obtient ces piles en se servant, comme électrodes, de mercure, et, comme électrolyte, d'une dissolution d'iodure alcalin, de l'iodure de sodium par exemple; pourvu que la densité du courant ne soit pas trop grande et que l'électrode positive soit de surface plus large que la négative, aucun dépôt ne se forme sur l'anode qui reste parfaitement nette; la liqueur, contenant l'iodure de mercure formé en dissolution dans l'iodure alcalin, demeure limpide, cependant que le sodium se combine presque intégralement à la cathode, à condition que la température ne s'élève pas trop.

Cet élément possède une force électromotrice, égale à 1 volt 85, qui est indépendante de la température. Il résulte des principes de la thermodynamique que, dans ces conditions, toute l'énergie chi-

mique qu'on communique à une telle pile se récupère bien sous forme d'énergie électrique.

On comprend aisément qu'avec des électrodes liquides, l'attaque peut se produire très complète et qu'il n'est pas besoin d'employer de grandes quantités de mercure; malheureusement les liquides ne sont pas faciles à manier, et, d'autre part, si l'on veut conserver la pile en charge avant de la faire travailler, il est tout à fait nécessaire de soustraire l'amalgame formé à la cathode au contact de la dissolution qui l'attaque à la longue. Ces conditions font que ces éléments ne sauraient, à l'heure présente, avoir un emploi dans la pratique industrielle courante ; mais, peut-être, sont-ils susceptibles de quelques perfectionnements.

Les applications des accumulateurs sont bien connues; on utilise volontiers aujourd'hui de petites batteries volantes dans les laboratoires ou dans les ateliers qui n'ont besoin que de courants intermittents; les automobiles, certains tramways font usage de ces précieux appareils.

Dans la grande industrie, ils n'ont pas tenu cependant tout ce qu'ils semblaient promettre; on avait voulu, par exemple, s'en servir comme transformateurs, et l'idée paraissait facilement réalisable, puisque les éléments dont se compose une batterie peuvent être associés de telle façon que l'on voudra pour changer la tension ou le débit; mais, comme ils ne peuvent, sans une grande usure, être soumis à des régimes variables, ils ont donné, dans ce rôle, de mauvais résultats. Aujourd'hui, ils sont surtout

employés pour constituer ce que l'on appelle des batteries tampon.

Dans toute installation, il convient d'avoir un dispositif permettant de recueillir l'énergie qui, à certains moments, peut être produite en quantité supérieure à la demande pour la pouvoir dépenser au moment où la consommation deviendra considérable.

Cette idée se trouve réalisée, pour les distributions hydrauliques, dans l'antique bief des moulins ; les volants des machines à vapeur jouent également le rôle de réservoir permettant de différer l'utilisation des surplus d'énergie mécanique.

Si l'on dispose une batterie d'accumulateurs en dérivation sur une distribution à potentiel constant, elle fonctionnera tantôt comme récepteur lorsqu'il y aura excès de force motrice, tantôt, au contraire, comme génératrice venant suppléer aux défaillances des dynamos.

En pratique, il convient pour avoir une bonne utilisation de ces batteries d'employer un survolteur à la charge et un réducteur de tension à la décharge ; les meilleures conditions à observer ont été très nettement indiquées par M. Loppé, et M. Thury a construit des appareils automatiques permettant d'assurer une régularité parfaite dans la distribution.

§ 4. — L'ÉLECTROCHIMIE

Il faudrait un volume, au moins, pour présenter, même en raccourci, un tableau fidèle des applications

de l'électricité à la chimie ; l'industrie électrochimique, née il y a trente ans à peine, a prospéré avec une rapidité inouïe et a conquis un domaine qui s'étend tous les jours. Jamais, sans doute, on n'assista à une si active évolution ; les procédés de fabrication de presque tous les corps usuels se modifient et, partout, sous une forme ou une autre, pénètre l'électricité.

L'on ne saurait aborder ici une étude qu'il appartiendrait, d'ailleurs, seulement à un chimiste professionnel de mener à bien et l'on se contentera de donner quelques brèves indications, destinées à faire sentir combien est profonde l'influence que les progrès de l'électrochimie ont exercé sur les arts chimiques.

•

L'énergie électrique est utilisée de deux manières, nettement différentes : ou bien, on la transforme, directement, en énergie chimique, pour produire avec les phénomènes de l'électrolyse, tantôt des métaux purs, tantôt divers composés plus ou moins complexes; ou bien, on la laisse simplement tomber sous forme d'énergie calorifique, mais dans des conditions telles qu'une énorme quantité de chaleur peut apparaître dans un espace restreint et porter ainsi à des températures extrêmement élevées des corps qui réagissent alors avec une vive intensité les uns sur les autres.

L'électrolyse qui, bien entendu, demande du courant continu, a fait, il y a longtemps déjà, une timide entrée dans l'industrie, lors de l'invention de la galvanoplastie. Il n'est pas utile d'insister ici sur

les procédés de nickelage, de cuivrage, d'argenture, de dorure qui se sont développés normalement mais qui, à part quelques perfectionnements de détail, sont restés tels qu'ils étaient au début. Dans les usines importantes, les dynamos ont remplacé les piles, et, comme il ne faut que des différences de potentiel de l'ordre de 1 à 4 volts pour déposer les divers métaux, on a soin de disposer en série un nombre convenable de bacs qui se distribuent la tension beaucoup plus élevée fournie par la génératrice.

Une application particulièrement intéressante de la galvanoplastie est l'affinage du cuivre. Il est remarquable que l'importance qu'a prise, de nos jours, le raffinage électrolytique du cuivre brut soit venue précisément des besoins de l'électricité elle-même. Pour les anciens usages, le cuivre impur fourni par le traitement métallurgique était presque toujours suffisant ; l'électricité a été plus exigeante ; les enroulements des machines demandent des fils de haute conductibilité, et la résistance du cuivre augmente beaucoup dès qu'il contient quelques impuretés. Ainsi une industrie considérable est née et l'on traite aujourd'hui plus de 250,000 tonnes de cuivre par an par un procédé très simple : le cuivre impur sert d'électrode positive dans un bain de sulfate de cuivre, et on transporte par le courant le métal sur des lames minces de cuivre pur formant l'électrode négative.

Malgré de nombreux essais, on n'a pas encore réussi à préparer, d'une façon courante, par l'électrolyse les métaux usuels ; les réactions secondaires compliquées qui se produisent dans la plupart des

cas créent des difficultes contre lesquelles s'est heurtée l'ingéniosité des inventeurs. Il est cependant un métal pour lequel la méthode électrolytique a pleinement réussi et a complètement supplanté les procédés chimiques beaucoup plus compliqués et beaucoup plus coûteux; ce métal est l'aluminium dont on connaît les précieuses qualités. En 1886 l'aluminium, fabriqué par la méthode classique de Sainte-Claire Deville, valait 80 francs le kilogramme, aujourd'hui, grâce aux travaux de M. Minet et de Héroult, il se vend environ 2 fr. 50 et a pu pénétrer dans les usages courants. Il s'obtient par la décomposition électrolytique de l'alumine dissoute dans la cryolithe, maintenue à l'état de fusion par le courant même qui traverse la masse.

Une autre industrie où l'électrolyse a victorieusement pénétré est la grande industrie du chlore et de de ses composés; « la prochaine génération tirera tout son chlore de l'électrolyse » disait, en 1895, un célèbre chimiste suisse, M. Lunge et il semble que le succès doive venir plus vite que ne l'indiquait cette prédiction. Dés à présent plusieurs usines exploitent un procédé donnant par la décomposition du sel marin ou du chlorure de potassium, soit le chlore à l'état de gaz qui se dégage à l'anode si on a soin de diaphragmer la cuve électrolytique et, d'autre part, l'alcali qui se concentre à la cathode; soit, si on supprime le diaphragme, les chlorures décolorants fournis par l'union du chlore et de l'alcali. Les anciens procédés chimiques se soutiennent encore parce qu'ils sont organisés depuis longtemps et qu'ils sont pratiqués dans des usines puis-

santes, liées à de multiples industries, verreries, cristalleries, fabriques de savons qui utilisent la potasse et la soude, mais leur résistance commence à faiblir.

Ils ont déjà à peu près abandonné à leur jeune rival la fabrication de la presque totalité du chlorate et du perchlorate du commerce. Ici, les avantages de l'électrolyse sont manifestes : dans l'ancienne méthode purement chimique, les 5/6[es] du chlore contenu dans le chlorure de potassium étaient définitivement perdus sous forme de chlorure de calcium; la réaction électrolytique se réduit au contraire à la fixation de l'oxygène de l'eau sur le chlorure de potassium qui passe intégralement à l'état de chlorate. Cette absence presque complète de sous-produits est l'un des caractères les plus intéressants des nouvelles méthodes.

Après quelques hésitations, l'électrolyse s'est emparée aussi d'une grande partie du riche domaine de la chimie organique, on ne saurait citer tous les corps : matières colorantes diverses, cyanures, chloroforme, iodoforme, etc., qui, dès à présent, peuvent être obtenus par des procédés électriques; il se produit, en ce moment même, une transformation rapide et l'on voit l'électricité, cet agent si souple, et dont les effets sont facilement dosables et réglables, prendre chaque jour une place plus importante dans les industries qui exigent la précision et la rigueur des expériences de laboratoire.

Parallèlement aux méthodes électrolytiques se sont développées les méthodes électrothermiqnes; bien différents dans leur essence, les deux procédés sont

cependant assez semblables dans l'application et l'on voit souvent la même usine fabriquer avec des appareils très analogues l'aluminium et des carbures métalliques.

L'origine de cette chimie nouvelle si fertile en résultats imprévus et que l'on a justement appelé la chimie des hautes températures se trouve dans l'invention du four électrique.

Ce merveilleux instrument n'est pas ancien et cependant son histoire, déjà longue, serait fort difficile à écrire. Ses débuts, en particulier, sont entourés d'une certaine obscurité, depuis longtemps on a dû penser à utiliser la haute température de l'arc pour produire des réactions chimiques, mais c'est sans doute à l'exposition internationale d'Electricité de 1881, d'où datent d'ailleurs tant de découvertes, que parurent les premiers appareils systématiquement établis pour chauffer ainsi des creusets ; M. M. Siemens d'une part, M. Clerc d'autre part exposaient des fours où ils volatilisaient la silice et la chaux.

Il serait oiseux de citer ici les noms de tous les constructeurs et de tous les savants qui, dans les divers pays, ont imaginé des dispositifs perfectionnés; on rappellera seulement qu'au point de vue scientifique le four électrique a été, en France, l'objet des travaux désormais classiques de M. Violle et de M. Moissan.

Dans des expériences conduites avec tout l'art d'un physicien consommé, M. Violle a mesuré les températures que le nouvel instrument permettait d'atteindre; de son côté l'illustre Moissan, dont la science déplore la disparition prématurée, a montré

par de multiples exemples, tout le parti que les chimistes pouvaient tirer des moyens puissants que l'électricité mettait à leur service.

Parmi les résultats obtenus par Moissan, il en est un qui a beaucoup contribué à populariser le four électrique ; je veux parler de la reproduction des pierres précieuses et, particulièrement, du diamant.

Le charbon pur, le charbon de sucre se dissout, on le sait depuis longtemps, dans la fonte en fusion ; si la dissolution est saturée on pourrait espérer obtenir, par refroidissement, du charbon cristallisé, du diamant ; mais, dans cette expérience comme dans toutes les autres analogues qui déjà avaient été tentées, au lieu de la forme désirée, au lieu du corps limpide et brillant, on trouve une matière noire et commune, du simple graphite. Moissan eut l'idée simple de faire la dissolution à haute température et de produire la cristallisation sous de fortes pressions. Dans ces conditions spéciales il put recueillir de très petites particules cristallisées, sans valeur commerciale, mais, qui, nettement, présentaient tous les caractères du diamant le plus pur.

Le procédé employé pour obtenir la pression nécessaire est extrêmement ingénieux : la fonte occupant à l'état solide un volume plus grand qu'à l'état liquide, si on plonge rapidement le culot sortant du four dans l'eau, il se solidifie seulement à la surface, et il se forme une enveloppe de fer dans l'intérieur de laquelle se refroidit lentement la fonte, en même temps qu'il s'y produit des pressions considérables.

Peut-être pourrait-on penser que, scientifique-

ment, il n'y avait pas un intérêt plus grand à reproduire le diamant qu'une autre substance cristallisée quelconque et que, industriellement, le procédé conduit à une dépense énorme pour produire des parcelles sans valeur. Mais si l'on raisonnait ainsi l'on commettrait une véritable erreur ; outre qu'elle était fort importante au point de vue scientifique, parce qu'elle résolvait enfin un problème décevant qui semblait défier depuis longtemps la sagacité des chimistes, la découverte de Moissan avait une très haute importance philosophique.

Elle donnait un renseignement précis sur la façon dont a pu se produire, dans les temps géologiques, le précieux cristal; elle prouvait que, désormais l'homme avait assujetti les forces de la nature qui, autrefois, dominaient son ignorance; elle était éminemment propre à faire sentir à la foule la beauté de la science, à inspirer le respect de sa puissance.

Une expérience si retentissante ne pouvait manquer de rendre populaire la nouvelle méthode de recherches et elle contribua certainement, pour une large part, à faire sortir le four électrique du laboratoire et à le faire entrer dans l'industrie, où il joue maintenant un rôle considérable dont l'importance augmente tous les jours.

Les fours modernes à arc ressemblent encore beaucoup au premier type industriel qu'avait construit M. Bullier pour la préparation des carbures et qui comportait une électrode de charbon et une sole conductrice également en charbon; mais, pour beaucoup d'opérations, on emploie plutôt des fours à résistance, où le courant agit selon la loi de

Joule, en échauffant par son passage ou une âme conductrice disposée entre les pôles qui amènent le courant, ou les matières elles-mêmes qui doivent réagir lorsqu'elles ne sont pas isolantes. Il existe aussi des appareils mixtes à résistance et à arc qui nécessitent des courants moins intenses, et l'on doit enfin signaler un système remarquable, inventé par Kjellin et Benediks, de four sans électrodes. Ce four est en réalité un véritable transformateur dont le primaire reçoit un courant de haute tension, et dont le secondaire, constitué par le creuset lui-même, sera parcouru par un courant d'une énorme intensité.

Dans le four, utilisé par M. Moissan d'une façon courante, la chute de potentiel était de 80 volts, l'intensité atteignait 1,000 ampères; on mettait ainsi en jeu, dans un espace très restreint, une puissance de 80 kilowatts, c'est-à-dire de plus de 100 chevaux; pour la plupart des applications industrielles, les températures que l'on pouvait ainsi obtenir étaient même beaucoup trop élevées; le nombre des composés stables dans de telles conditions est, sans doute, fort limité, et le progrès a plutôt consisté à augmenter la capacité des fours, en abaissant la température, qu'à accroître encore l'énergie disponible dans un espace donné.

Aujourd'hui l'on est arrivé à construire des appareils qui ont 1m,50 de côté sur 1 mètre de profondeur. Pour la fabrication de l'aluminium qui exige, outre le phénomène de fusion produit par l'échauffement électrique, un phénomène d'électrolyse, on emploie, bien entendu, le courant continu, mais pour les autres opérations où seule doit agir la

haute température, on utilise beaucoup plus volontiers l'alternatif qui se prête à la transformation. On a, dans certains cas, fait monter l'intensité jusqu'à 10,000 ampères, ce qui correspond, avec les fours à résistance qui exigent une tension d'une trentaine de volts, à une puissance de plus de 350 chevaux.

Il y a une dizaine d'années, la moitié de l'énergie dépensée pour l'électrochimie était consacrée à la fabrication du carbure de calcium; on sait que ce corps, dont Moissan a fait une étude chimique très complète, se forme spontanément dans les fours électriques construits avec de la chaux vive, il n'est donc pas étonnant qu'il ait été obtenu, vers la même époque, par divers chercheurs, et que l'on ait songé, en divers endroits, à utiliser la précieuse propriété qu'il possède de réagir sur l'eau pour donner l'acétylène. Aussi, beaucoup d'usines entreprirent-elles de le fabriquer jusqu'au moment où une véritable crise éclata, provoquée, d'une part par la surabondance de la production, et d'autre part, par les litiges que souleva la question de la reconnaissance des brevets. Toute chose a son bon côté et les progrès de la science elle-même peuvent être accélérés par des causes occasionnelles. La nécessité où se trouvèrent certaines industries de chercher d'autres modes d'emploi de leurs installations électriques contribua certainement à la mise au point d'un grand nombre d'autres réactions électrothermiques qui actuellement sont passées dans la pratique.

On ne peut que citer ici la préparation des corps durs : corindon, siloxicon, carborandum; celle de plusieurs composés alcalinos-terreux; celle encore des

sels de baryte. Rappelons aussi la très intéressante fabrication du graphite qui fut certainement l'une des premières industries qui utilisa le four électrique, puisque le procédé, employé aujourd'hui à Levallois-Perret, a été décrit dès 1895 par MM. Girard et Street, à la suite de remarquables recherches.

Mais l'électricité n'a pas arrêté là ses conquêtes, elle a voulu s'annexer la plus riche partie des domaines de la grande industrie chimique et elle n'a pas craint de s'attaquer à la métallurgie elle-même. Là encore c'est Moissan qui détermina scientifiquement la route à suivre ; il montra comment, dans le four électrique, se réduisent par le charbon tous les oxydes métalliques (sauf la magnésie) avec production de carbures ou de fontes qui peuvent ensuite être affinées, et, depuis 1901, l'électrométallurgie contribue, pour une part importante, à la production de diverses fontes ou aciers spéciaux ; il n'est pas possible d'entrer ici dans les détails que l'ont peut trouver dans des livres particuliers [1]; disons seulement que, dès aujourd'hui, la méthode électrique a presque remplacé les anciennes préparations des ferrochromes et des ferrosiliciums et que, grâce aux très ingénieux efforts de divers inventeurs, parmi lesquels il convient de mentionner en première ligne M. Héroult et MM. Stassano, Kjellin, Girod, Gin, Keller, etc., le moment ne paraît plus éloigné où l'acier et la fonte électriques lutteront victorieusement avec les métaux que fournissent les procédés classiques ; certains essais permettent même d'espérer que le cui-

1. En particulier dans l'excellent ouvrage : *l'Électrométallurgie des fontes, fers et aciers*, publié par M. C. Matignon.

vre, le nickel pourront être, eux aussi, obtenus dans le four électrique dans des conditions suffisamment rémunératrices.

Les deux grandes méthodes, électrolyse, electrothermie, dont on vient de rapidement examiner les principales applications, ne sont pas les seules que l'électricité mette à notre disposition pour nous permettre de produire des réactions chimiques. Il y à déjà de nombreuses années que M. Berthelot a utilisé l'effluve pour obtenir certains corps, en particulier l'ozone. Cette expérience célèbre, reproduite aujourd'hui en grand, a fait de l'ozone un produit industriel; avec une tension de 12.000 volts environ produite par un transformateur qui est alimenté par de puissantes machines, on obtient, grâce à l'interposition d'un condensateur, des étincelles oscillantes qui sont très favorables à la condensation de l'oxygène de l'air. L'ozone est utilisé pour divers usages: blanchiment des tissus, vieillissement des alcools, fabrication de divers parfums et surtout stérilisation des eaux destinées à l'alimentation des villes. Des expériences faites dans plusieurs pays ont démontré la grande efficacité de cette méthode de purification; le procédé très bien étudié de MM. Abraham et Marmier donne, en particulier, d'excellents résultats.

Mais l'effluve est peut-être appelée à rendre dans l'avenir des services signalés sur un plus vaste terrain; depuis quelques années, l'on étudie avec ardeur le passionnant problème de la fixation de l'azote qui existe si abondamment autour de nous et dont l'homme n'a su jusqu'à présent tirer directement

aucun parti. Et cependant, ici encore, la nature offre un modèle qu'il n'est sans doute pas impossible de suivre. La nitrification artificielle a été d'ailleurs réalisée, il y a plus d'un siècle, par Cavendish, mais il est possible de la produire désormais d'une manière avantageuse. Appliquant des idées émises par Lord Rayleigh et Sir W. Crookes, deux physiciens très distingués, M. de Kowalski et M. Birkeland, ont, en particulier, imaginé, chacun de leur côté, des dispositifs pratiques au moyen desquels on obtient très régulièrement des composés nitrés avec de l'air traversé par de puissantes décharges électriques. Le rendement est bon, quand les décharges sont produites par des courants alternatifs de faible intensité, de haut voltage et de fréquence élevée. Il est aussi avantageux d'employer des gaz où la proportion d'oxygène est plus forte que dans l'air normal; on sait que l'on peut aujourd'hui, facilement et économiquement, enrichir l'air en oxygène par la liquéfaction.

Il serait prématuré de se prononcer sur l'avenir économique de ces intéressants procédés mais on peut cependant prévoir qu'il prendront une place importante dans la fabrication des engrais.

Ainsi, petit à petit, toutes les branches de la chimie reçoivent grâce à l'électricité, une sève nouvelle; et, comme partout où elle pénètre, l'énergie électrique apporte avec elle ses précieuses qualités ; elle simplifie, donne de meilleurs rendements, permet des réglages plus faciles, en un mot, elle transforme les antiques procédés et, de ce qui n'était qu'un art, elle fait une véritable science.

CHAPITRE VIII

L'éclairage électrique.

---

§ I. — LES PRINCIPES SCIENTIFIQUES DE L'ÉCLAIRAGE.

Par les avantages qu'elle présente au point de vue de l'hygiène et de la sécurité, par sa douceur, sa commodité, sa facilité d'allumage et d'extinction, la lumière empruntée à l'énergie des courants est peut-être l'application qui a le plus contribué à rendre populaire la science électrique ; les lampes à arc et les lampes à incandescence ont, pour ainsi parler, fait une brillante réclame qui a grandement servi à répandre dans le public le goût des choses de l'électricité et qui a suscité chez beaucoup de personnes le désir de connaître et de comprendre les phénomènes dont ces éclatants appareils étaient le siège.

L'éclairage électrique est devenu pratique, au moment même où les transformations de la vie sociale faisaient naître un désir intense de supprimer artificiellement l'obscurité des nuits. La découverte de nouveaux moyens capables de produire et de dis-

tribuer commodément de grandes quantités de lumière n'a d'ailleurs pas été étrangère à la création des besoins qu'elle permettait de satisfaire; ainsi, une fois de plus, par le jeu des actions et des réactions, les organes et la fonction se développaient solidairement.

On a publié, au sujet des exigences toujours croissantes de l'œil humain, d'intéressantes statistiques; dans une très belle conférence, faite il y a déjà de nombreuses années, l'un des Maîtres de la physique, M. Mascart, cite en particulier quelques faits très curieux.

En 1785, le roi Louis XVI donnait, dans la salle des Glaces du palais de Versailles, une grande fête; d'après les comptes qui ont été retrouvés, l'on employa 1800 chandelles de cire et cette quantité correspondait environ à deux dixièmes de bougies par mètre cube; les gazettes d'alors relatèrent comme un événement prodigieux cette orgie de lumière et il se trouva sans doute bien des personnes pour blâmer un tel luxe. Un siècle à peu près s'écoule et, pour un noble personnage qui vient rendre visite à la France, la salle des Glaces se rouvre: en 1873, on offre au shah de Perse une réception et l'on allume 4.000 bougies correspondant à plus de quatre dixièmes de bougies par mètre cube; les journaux qui rendirent compte de la soirée ne font aucune remarque particulière sur l'éclairage qui parut évidemment très normal. Cinq ans plus tard, en 1878, au moment de l'Exposition universelle, on crut devoir, pour une nouvelle fête au même endroit, doubler encore l'éclairage qui,

avec 8.000 bougies, atteignait une valeur de plus de huit dixièmes par mètre cube et cependant il se trouva des invités qui se plaignirent du manque de lumière.

Combien leurs plaintes seraient plus vives aujourd'hui, s'ils pénétraient, le soir venu, dans une chambre qui ne serait pas plus éclairée! Nos rues nous paraissent souvent mornes et tristes avec une ou deux bougies par mètre cube, et, sur la scène de nos plus modestes théâtres, le plus parcimonieux des directeurs n'oserait pas représenter un salon où il n'y aurait pas, au moins, cinq fois plus de lumière encore.

Le problème de la lumière artificielle a donc pris une importance de plus en plus grande et, pour le résoudre, l'électricité et les autres procédés d'éclairage ont entrepris une lutte féconde qui dure encore et où l'avantage, chaudement disputé, a successivement appartenu aux divers concurrents. Ces pacifiques combats ont beaucoup aidé au progrès, les rivaux, cherchant à se munir des armes les plus sûres, se sont adressés à la science qui a dû parfois, pour répondre à leurs demandes, perfectionner ses propres procédés.

Les théories du rayonnement qui se rattachent aux questions les plus élevées de l'optique et de la thermodynamique ont ainsi subi l'épreuve de la pratique; elles ont dû être confrontées avec les faits; certaines découvertes, comme celle que fit en 1890, après dix ans de pénibles efforts, le docteur Auer von Welsbach, surprirent d'abord les physiciens et parurent même ébranler des principes

que l'on croyait très solidement établis, mais un examen attentif fut beaucoup plus favorable et l'œuvre édifiée par les Kirchhoff, les Stephan, les Boltzmann, qui avait paru un instant compromise, est, au contraire, désormais consolidée par de nouveaux travaux dus à MM. Pringsheim et Lummer, Wien, Rubens, Ch.-Ed. Guillaume, Le Chatelier, Fery, etc.

Pour comprendre les perfectionnements apportés par les recherches récentes dans la production de la lumière électrique, il est nécessaire d'avoir présents à l'esprit quelques principes essentiels que nous rappellerons brièvement.

Un corps lumineux est un corps qui communique à l'éther environnant des vibrations plus ou moins complexes, mais quelques-unes d'entre elles doivent être capables d'impressionner notre œil et ont, par conséquent, des longueurs d'onde comprises entre $0^{\mu},8$ et $0^{\mu},4$. Ce corps rayonne ainsi autour de lui une certaine puissance qui doit nécessairement trouver son origine en quelque endroit.

Le plus souvent ce sera une source calorifique qui fournira à la substance rayonnante l'énergie qu'elle émet; il s'agit alors d'un phénomène d'incandescence et l'on se trouve en présence d'un rayonnement thermique proprement dit.

Dans d'autres cas, le corps subira des modifications chimiques, tel le phosphore qui s'oxyde, ou recevra un apport d'énergie électrique, tel le gaz lumineux du tube de Geissler, illuminé par une décharge électrique, et l'on dira que l'on a affaire à une source luminescente.

Depuis la plus haute antiquité jusqu'à ces dernières années, on a exclusivement employé pour l'éclairage des procédés qui se rattachent à la première catégorie, et, presque toujours, le corps rayonnant fut du charbon; c'est du charbon incandescent qui éclaira nos ancêtres dans les torches de résine, c'est du charbon qui nous éclaire dans la flamme des bougies, des lampes, des becs de gaz où il se trouve en suspension, c'est encore du charbon qui nous envoie de la lumière dans l'ampoule électrique ou dans l'arc dont l'éclat provient surtout de l'électrode positive qui amène le courant.

Ce choix de la substance rayonnante fut sans doute déterminé à l'origine par la facilité avec laquelle le charbon, s'unissant à l'oxygène de l'air, dégage une grande quantité de chaleur capable de porter à une haute température les particules de carbone contenues dans la flamme, mais il fut particulièrement heureux à un autre point de vue, et l'on a même cru longtemps qu'il était le meilleur, parce qu'il peut paraître avantageux de s'adresser à un corps qui se rapproche du corps noir idéal, pour lequel l'énergie rayonnée est, pour chaque température et chaque radiation, la plus grande possible.

Le corps noir serait aussi, d'après Kirchhoff, celui qui absorberait la totalité d'une radiation quelconque qui le viendrait frapper et transformerait intégralement en chaleur l'énergie correspondante. Il es' intéressant de connaître les lois de son rayonnement plus simples sans doute que pour tous les autres corps

On sait que, s'appuyant sur le principe de Carnot

Kirchhoff a démontré que le rayonnement intérieur à une enceinte isothermique ne dépend pas de la nature des parois, mais de la température seule et doit être identique à celui du corps noir à la même température ; si, par suite, l'on pratique dans une petite boule métallique à température uniforme, une ouverture très petite, on réalise un élément de surface d'un corps noir, tant au point de vue de l'absorption qu'au point de vue de l'émission. C'est par ce procédé que, dans ces dernières années, divers physiciens et particulièrement en Allemagne, MM. Lummer et Pringhseim et MM. Lummer et Kurlbaum ont pu expérimentalement mener à bien l'étude de diverses questions relatives au rayonnement.

Il faut bien comprendre que le mot noir, qui a été d'abord employé parce qu'il convenait bien pour désigner une substance absorbant toute radiation qui la frappe, se trouve, par la suite, singulièrement détourné de son acception primitive ; ainsi, lorsqu'il s'agira des phénomènes d'émission, on sera amené à dire que, de deux surfaces égales portées à la même température, la plus noire sera précisément celle qui est la plus lumineuse, et, par une pente naturelle, on arrive à des extensions plus singulières encore ; par exemple, l'on dira avec M. Rubens, que le manchon d'un bec Auer, placé dans une enveloppe argentée, noircit dans le bleu, parce que l'éminent physicien a démontré que, dans ces conditions, cette substance incandescente tend à produire une émission de lumière bleue égale à celle du corps noir. Ce langage bizarre, et par trop coloré, ne laisse pas que d'avoir quelques inconvénients qui ont été très

bien mis en évidence par M. Ch.-Ed. Guillaume; cet érudit et ingénieux savant, qui a publié sur les questions relatives au rayonnement des études très pénétrantes, a proposé, pour désigner le corps noir théorique, le nom expressif de radiateur intégral que nous adopterons désormais.

Dans les limites les plus larges, la puissance totale rayonnée par le radiateur intégral est proportionnelle à la quatrième puissance de la température absolue et s'élève, par suite, très rapidement quand augmente cette température. C'est la loi de Stéphan, établie en 1879 par ce physicien qui la tira des travaux déjà exécutés à son époque, rattachée par Boltzmann aux principes de la thermodynamique, et dont les expériences de MM. Lummer, Pringsheim, Kurlbaum, ont démontré, en ces dernières années, la grande exactitude.

Mais la radiation totale se compose d'une multitude d'ondes de fréquences différentes, les unes purement calorifiques, de grande longueur d'onde, les autres lumineuses et d'autres encore vibrant avec une extrême rapidité et situées dans le spectre au delà du violet, et, à mesure que la température du radiateur s'élève, la composition de l'ensemble s'étend et s'amplifie sans cesse.

Chaque radiation élémentaire croît avec la température, mais l'accroissement diffère suivant la longueur d'onde. En admettant une loi de répartition, deduite du calcul des probabilités, pour l vitesses des molécules vibrantes, et en s'appuyan par ailleurs, sur la thermodynamique, M. Wien démontré que le produit de la longueur d'onde co

respondant, pour chaque température, à la radiation possédant le maximum de puissance par la température absolue de la source, est constant.

Il résulte de cette loi, suffisamment vérifiée par l'expérience, que si la température du radiateur augmente, la puissance maximum se déplace régulièrement vers les ondes les plus courtes. On peut calculer quelle devrait être la température de la source pour que la radiation correspondant au maximum d'énergie appartienne au spectre visible; si l'on veut que le maximum soit, par exemple, dans le jaune, il faudra élever le corps rayonnant à 4.600 degrés centigrades; c'est une température qu'aucun de nos procédés d'éclairage ne nous permettrait actuellement d'atteindre. Mais il y aura intérêt a élever autant que possible la température des corps analogues au radiateur intégral pour que le maximum se trouve rapproché des radiations visibles.

Un certain nombre de physiciens et, particulièrement des savants allemands, se sont beaucoup préoccupés, en ces derniers temps, de rechercher non seulement la position du maximum, mais d'étudier, d'une façon complète, la répartition de l'énergie dans le spectre du radiateur intégral ; il ne semble pas que les résultats obtenus sur ce sujet soient parfaitement concordants ; les diverses formules proposées par MM. Wien, Plank, Thiesen, représentent cependant assez bien les faits et pourraient servir à calculer la température pour laquelle la puissance dans l'ensemble du spectre visible serait maximum. On trouverait ainsi une température encore beau-

coup trop haute pour la pratique, mais, on doit au moins retenir de cette étude que le rapport des radiations lumineuses aux radiations calorifiques croît lorsqu'on élève la temperature et que, par suite, le rendement lumineux s'améliore dans les mêmes conditions. Ainsi, pour toutes les sources qui se rapprochent du radiateur intégral, on a tout intérêt, au point de vue de l'éclairage, à obtenir des températures aussi élevées que possible.

Mais tous les corps réels s'éloignent, à des degrés divers, du radiateur intégral ; chez eux, la puissance de chaque radiation sera moindre, à température égale, que pour la substance noire idéale; leurs propriétés particulières fourniront cependant, pour l'éclairage, des résultats qui pourront être excellents, parce que, dans certains cas, leur pouvoir émissif pourra beaucoup plus se rapprocher, dans la partie visible, de celui du radiateur intégral que dans la partie obscure du spectre. Ainsi, d'après les expériences de MM. Lummer et Kurlbaum, le platine incandescent a un spectre présentant, à la même température, son maximum beaucoup plus près de la région visible que le radiateur intégral. On sait d'ailleurs, depuis les belles recherches effectuées en 1902 par MM. Rubens et Hagen, que ce métal possède un pouvoir réflecteur qui décroît avec la longueur d'onde, il n'est donc pas étonnant que son pouvoir émissif, complémentaire du pouvoir réflecteur, soit particulièrement élevé dans la parti visible du spectre et que, par suite, un filament d platine rayonne dans l'espace, pour une même quan-

tité de radiations lumineuses, moins de radiations invisibles que le corps noir absolu.

Le platine n'est pas la seule substance qui possède ainsi un pouvoir sélectif : les métaux réfractaires jouissent de cette même propriété qui appartient aussi aux oxydes des terres rares employés dans la fabrication des manchons Auer.

Pour les applications, il serait fort important de savoir évaluer le rendement des sources lumineuses ; on le pourrait définir comme égal au rapport de la puissance contenue dans la partie visible à la puissance totale du rayonnement. Mais cette définition serait pratiquement insuffisante : les limites du spectre visible sont mal déterminées, et, comme la plupart des sources lumineuses sont précisément très riches dans cette région frontière qui est le rouge extrême, l'indécision entraînerait des divergences très grandes dans l'évaluation du rendement.

Par ailleurs, des considérations physiologiques fort délicates viennent singulièrement compliquer la question; la valeur éclairante ne dépend pas seulement de la puissance rayonnée, mais encore de la répartition de cette puissance dans le spectre visible lui-même. Notre œil n'est pas également sensible à toutes les radiations; très mal adapté à la perception du rouge, médiocrement à celle du violet, il est, au contraire, facilement impressionné par le jaune verdâtre qui, dans le spectre solaire, se trouve précisément correspondre au maximum d'énergie.

On peut voir là sans doute un exemple remar-

quable d'adaptation de l'organe au milieu; quoi qu'il en soit, pour cette couleur, la sensibilité est prodigieuse; M. Ch.-Ed. Guillaume calculait qu'en transformant en énergie lumineuse correspondant à cette teinte une petite calorie, on obtiendrait assez de lumière pour impressionner un œil normal pendant plus de cent millions d'années.

Si l'on veut se rendre un compte parfaitement exact de la valeur photogénique des sources lumineuses, il convient donc de savoir apprécier la sensibilité de l'œil pour les différentes couleurs et l'on doit résoudre des problèmes de photométrie très complexes et au sujet desquels, il faut l'avouer, l'accord n'est pas encore entièrement fait entre les physiciens et les physiologistes.

Un résultat apparaît cependant comme incontestable; quelle que soit la définition adoptée pour le rendement lumineux, ce rendement est, dans nos procédés actuels, toujours détestable.

Dans la flamme d'une bougie, pour cent mille calories, mesurant l'énergie libérée par la combustion, on utilise à peine, pour la production des radiations visibles, une énergie correspondant à quinze calories! Les sources lumineuses découvertes par les physiciens modernes sont beaucoup plus favorables : le bec Auer fournit un rendement voisin de 1 pour 100, les lampes électriques utilisent pour l'éclairage plus de 2 pour 100, et la lampe à arc davantage encore de l'énergie qui leur est fournie mais la proportion reste encore véritablement dérisoire.

Heureusement, cette prodigalité n'a pas de consé-

quences bien ruineuses, à cause de l'extraordinaire sensibilité de l'œil et du prix minime de l'énergie calorifique; mais, lorsqu'il s'agit de l'éclairage produit au dépens de l'énergie électrique relativement coûteuse, la question du rendement acquiert une importance beaucoup plus grande.

De grands progrès ont été récemment réalisés dans la construction des lampes à incandescence; mais, malgré tout ce qui a pu être fait dans cette voie, l'emploi de ces appareils ne paraît qu'un pis aller; ils fournissent toujours une faible proportion de radiations lumineuses mêlées à des radiations calorifiques nombreuses et inutiles. Nous verrons comment, par un autre côté, on s'est attaqué à la question, et comment, au moyen de phénomènes électriques différents, on peut obtenir des sources lumineuses donnant de la lumière froide.

§ 2. — LES LAMPES A INCANDESCENCE

L'idée de tirer parti de la chaleur dégagée par un courant électrique pour porter une substance réfractaire à l'incandescence et pour obtenir ainsi un procédé d'éclairage avantageux à beaucoup d'égards, est déjà fort ancienne.

Elle a suscité de nombreuses recherches; le premier brevet relatif à une lampe de ce genre remonte à l'année 1841; il fut pris, en Angleterre, par Frédérick de Moleyns qui décrivait un appareil à filament de platine recouvert de particules de charbon qui était véritablement fort ingénieux. Mais, malgré les précieuses propriétés du platine relativement au

pouvoir émissif, ce corps ne saurait guère convenir pour la fabrication d'une lampe ; il fond à une température de 1.775° et ne peut être porté, sans être rapidement détérioré, à une température suffisante pour que le rendement devienne satisfaisant. L'éclairage électrique ne devint réalisable que le jour où l'on parvint à construire les ampoules renfermant un filament de charbon.

On ne saurait relater ici les discussions historiques, mêlées à des débats d'ordre financier, auxquelles ont donné lieu les questions d'antériorité entre divers inventeurs, mais on peut dire qu'Edison a, le premier, réussi à introduire les lampes à incandescence dans la pratique industrielle.

Il serait oiseux de décrire la lampe que chacun connaît aujourd'hui ; on sait comment les perfectionnements apportés aux procédés de fabrication ont amélioré le rendement et abaissé, en même temps, le prix de revient. Aujourd'hui le filament formé de cellulose carbonisée est toujours nourri par un dépôt de charbon provenant de la décomposition d'un hydrocarbure ; on obtient ainsi une section parfaitement régulière et surtout l'on a l'avantage de recouvrir le corps, dont on va utiliser l'incandescence, d'un dépôt de graphite d'aspect métallique qui donne à ce corps un pouvoir sélectif particulier et augmente singulièrement sa valeur photogénique.

Il importe, au plus haut point, que le filament soit placé dans un bon vide, aussi parfait que possible ; non seulement pour que le charbon ne brûle pas, mais aussi pour qu'il se refroidisse peu. L'extraction

de l'air commencée par des pompes, est généralement achevée par un procédé chimique ; on emploie le phosphore pour former avec les dernières particules de gaz un précipité solide facile à éliminer.

Pour avoir un bon rendement, il faut, d'après ce que nous savons sur le rayonnement, élever autant que possible la température et pousser la lampe au maximum ; toutefois un traitement excessif pourrait rapidement la mettre hors de service. Le filament ne brûle pas, mais s'évapore, il semble bien que la rupture se produit le plus souvent du côté de la cathode et que l'on se trouve ici en présence d'un phénomène de projection cathodique. Cette évaporation produit, même en régime normal, un dépôt de charbon sur l'ampoule qui abaisse beaucoup le rendement lumineux.

Si l'on tient compte de toutes les conditions, prix de revient de la lampe, durée de sa vie suivant la température à laquelle elle est soumise, valeur de l'énergie électrique, etc., on est amené à cette conséquence qu'il convient de remplacer une ampoule au bout de cinq à six cents heures en moyenne, alors même qu'elle fonctionnerait encore et qu'il est bon de la pousser à une température que l'on peut estimer voisine de 1.800° [1].

On pourrait obtenir de meilleurs résultats et porter la température à de plus hautes valeurs en remplaçant le maigre conducteur des lampes ordinaires

1. Il n'est pas facile d'évaluer ces températures ; parmi les meilleures déterminations l'on doit citer celles de M. Le Chatelier et celles qu'a faites M. P. Janet en étudiant, d'une manière fort ingénieuse, le refroidissement du filament.

par de gros filaments qui éprouveraient des altérations moins rapides, mais les lampes ainsi construites demandent des tensions beaucoup plus faibles que les lampes ordinaires ; il est alors nécessaire de les grouper de façon à subdiviser la tension du réseau, ou de les alimenter par un courant alternatif et de joindre à l'appareil un petit transformateur-réducteur ; ce sont là des complications peu importantes, mais qui sont cependant de nature à nuire au succès du système.

On est ainsi arrivé, petit à petit, à abaisser notablement la consommation de puissance électrique dans les lampes a incandescence : elle n'est plus que 4 à 3 watts par bougies,[1] mais il ne semble guère possible de descendre beaucoup plus bas si l'on conserve le charbon comme corps rayonnant.

Les tentatives faites, en ces dernières années, pour obtenir un filament plus inaltérable sont innombrables. Des résultats fort intéressants ont été obtenus en employant des métaux plus réfractaires que le platine.

M. Auer, le premier, dans cette voie. est parvenu à fabriquer des lampes fonctionnant régulièrement ; il s'est adressé à l'osmium qui est un métal rare de la mine de platine, fondant à 2.500° seulement.

1. L'intensité lumineuse d'une source varie notablement suivant les diverses directions ; on devrait comparer les intensités lumineuses moyennes sphériques, qui permettraient d'évaluer le flux total ; le plus souvent, on donne la valeur de l'intensité horizontale moyenne (dans un plan perpendiculaire à l'axe et passant par le milieu du filament), parce que cette intensité a la valeur maxima,

L'habile chimiste a préparé, en réduisant l'acide osmique par le charbon, un corps qui peut être aggloméré, puis filé à la presse. Comme le filament devient mou à la température élevée qu'il doit subir, il faut l'ancrer à l'intérieur de l'ampoule par des supports appropriés. La résistance de l'osmium, contrairement à ce qui se produit dans le cas du charbon, augmente avec la température; cette circonstance est favorable, parce qu'elle permet de régulariser le courant qui traverse la lampe et de rendre ainsi l'intensité lumineuse plus indépendante des variations de tension dans le réseau. La lampe peut durer un millier d'heures, et consomme environ 2 watts par bougie, mais elle a le défaut de coûter assez cher.

Dans le courant de l'année 1905, une autre lampe est apparue qui commence à se beaucoup répandre, c'est la lampe au tantale de MM. Siemens et Halske construite d'après les résultats des recherches de M. Von Bolton. Le tantale pur, obtenu en réduisant par le potassium ou le sodium le fluotantalate de potasse, est un métal très ductile et d'une remarquable ténacité qui ressemble à de l'acier, mais dont le point de fusion est très élevé. Comme la résistivité de ce métal est faible, il est nécessaire d'avoir des fils très minces et très longs; dans le modèle, actuellement en usage, le filament a 650 millimètres de longueur et 0 ^{mm} 05 de diamètre. Pour loger un conducteur aussi long dans l'ampoule, il faut le replier et le diviser en éléments rectilignes soutenus par des supports isolés.

La lampe au tantale fonctionne régulièrement

et consomme de 1,7 à 2 watts par bougies horizontales ; d'après des recherches effectuées par M. Jouaust au laboratoire de la Société internationale des Electriciens, sous la haute et habile direction de M. Janet, la température du filament serait de plus de 200° supérieure à la température d'une lampe ordinaire.

Plus récemment on a essayé des lampes au tungstène, métal dont le point de fusion paraît être de 3,200° et dont on peut, par suite, attendre encore de meilleurs rendements ; on annonce que ces lampes donneraient une bougie pour 1 watt, 2 environ.

Dans tous ces systèmes, on utilise, en même temps que l'avantage des hautes températures, les propriétés sélectives des corps à l'éclat métallique. Grâce à la conductibilité des filaments, ces diverses lampes se prêteraient très bien à l'éclairage avec de faibles tensions et à la division de la lumière ; on peut seulement regretter qu'elles aient été inventées à un moment où déjà existaient partout des distributions à voltage plus élevé que celui qui, normalement, conviendrait le mieux pour leur emploi.

Au lieu de s'adresser aux métaux très rares, on peut chercher à constituer des filaments avec d'autres substances réfractaires, douées d'un grand pouvoir émissif : le brillant exemple du manchon Auer est là pour prouver quels avantages on peut retirer de la substitution au charbon de certains oxydes. Mais une difficulté se présente, qui, de prime abord, paraît insurmontable ; pour que ces oxydes soient portés à l'incandescence au moyen de l'énergie électrique, il

est nécessaire qu'ils se laissent traverser par le courant, et, précisément, ils semblent être des isolants presque parfaits.

Heureusement, leur énorme résistance diminue, comme celle de tous les électrolytes, lorsque s'élève la température. Le fait, signalé dès 1868 par un physicien français M. Le Roux, avait même été mis à profit par Jablochkoff pour la construction d'une lampe électrique, mais cet essai était bien oublié lorsque M. Nernst eut l'idée d'étudier les oxydes réfractaires, en vue de constituer des appareils pratiques, et parvint, après plusieurs années de recherches, à réaliser un système d'éclairage extrêmement remarquable.

Le filament, ou plutôt le bâtonnet, car ici le corps incandescent devient d'un diamètre assez gros, est formé d'une pâte plastique filée à la presse et desséchée. Cette pâte contient des agglomérants et de l'oxyde de zirconium mêlé à d'autres oxydes de terres rares[1] extraits de la gadolinite. On peut aussi se servir de magnésie qui a un pouvoir éclairant considérable; c'est elle, en effet, qui, portée à l'incandescence, fournit l'éblouissante lumière qui se produit dans la combustion du magnésium.

Pour que le courant, amené par des petits fils de

1. Il est avantageux ici, comme dans les manchons des becs Auer, d'avoir un mélange d'oxydes formant des *solutions solides* réciproques, M. Ch.-Éd. Guillaume a montré comment les beaux travaux de Rubens permettaient de preciser, sur ce point, une idée déjà émise par M. Le Châtelier; dans le manchon Auer l'oxyde de thorium, qui a un pouvoir émissif faible, se refroidit difficilement et sert à échauffer l'oxyde de cérium qui est le véritable corps lumineux.

platine, puisse passer dans le bâtonnet, il est nécessaire d'allumer la lampe; c'est-à-dire de porter la matière réfractaire à une température à laquelle elle devient conductrice. Comme on ne saurait sans regrets renoncer à trouver dans l'éclairage électrique les facilités particulières qu'il présente, d'ordinaire, pour l'allumage, il était nécessaire d'imaginer un procédé automatique permettant de chauffer le bâtonnet jusqu'au rouge sombre. M. Nernst a imaginé de l'entourer d'une spirale de platine qui, à l'origine, reçoit tout le courant et qui produit ainsi la chaleur nécessaire. Dès que l'oxyde a acquis une conductibilité suffisante, un petit électro-aimant met le fil de platine hors du circuit.

Mais cet ingénieux dispositif n'est pas la seule complication de la lampe; il faut encore un appareil capable de régler l'intensité du courant. Sans cette précaution le bâtonnet, devenant d'autant plus conducteur qu'il est plus chaud, serait traversé par une intensité rapidement croissante, et arriverait vite à une température où il se romprait; un artifice très simple, consistant à introduire en dérivation un fil de fer très fin dont la résistance augmente quand la température s'élève, à l'inverse de ce qui se passe dans le bâtonnet, va permettre d'obtenir un réglage parfait.

On pourrait croire, tout d'abord, qu'il y a un réel avantage à n'être plus obligé de placer le corps incandescent dans le vide; cette légère simplification est malheureusement compensée par d'assez sérieux inconvénients. Le bâtonnet, entouré d'air, se refroidit beaucoup plus rapidement; en outre, comme l'indi-

quent certains auteurs, l'air est sans doute ionisé aux hautes températures où il se trouve porté, et il peut ainsi, non seulement enlever de la chaleur par sa conductibilité thermique, mais encore livrer passage à une partie du courant dissipé en pure perte. Il n'est pas cependant possible de faire le vide dans la lampe, qui, pour d'autres raisons, ne fonctionnerait plus.

Les filaments, formés par des composés tels que les oxydes, peuvent en effet se dissocier dans le vide et seraient rapidement décomposés si on les chauffait dans un espace privé d'air. D'autre part les oxydes appartiennent à la classe des électrolytes et, pour atténuer les effets de l'électrolyse, il convient que le métal qui tend à se déposer puisse être oxydé aux dépens de l'oxygène environnant.

Placée dans des conditions convenables, la lampe Nernst fonctionne très régulièrement ; elle donne une lumière très belle et très blanche parce que le corps incandescent est porté à une température voisine 2,400° ; elle consomme en moyenne 2 watts par bougie.

On ne saurait trop admirer l'ingéniosité de l'inventeur, M. Nernst a donné un bel exemple de persévérance ; il a vaincu toutes les difficultés semées sur sa route et ces difficultés n'étaient pas médiocres. Dans une conférence faite à Goettingue il disait : « Lorsque l'on est parvenu à combler le profond abîme qui sépare une invention de sa réalisation, ou, si l'on préfère, la théorie de la pratique, on trouve encore devant soi le chemin long et pénible qui mène du Laboratoire aux applications convenables

pour la vie usuelle ». L'illustre physicien a su le parcourir jusqu'au bout, ce chemin si souvent décourageant ; malheureusement avec tous les accessoires nécessaires, la lampe Nernst se complique et atteint un prix un peu élevé.

Depuis l'invention de M. Nernst, on a cherché d'autres combinaisons d'oxydes, on peut, en particulier, signaler une lampe imaginée par M. Canello et qui est intéressante parce que, se composant d'un filament formé d'oxydes alcalino-terreux, recouvert d'une couche mince d'osmium métallique; elle réalise une combinaison mixte capable de donner d'excellents résultats.

§ 3. — LES LAMPES A ARC

Pendant que les lampes à incandescence étaient l'objet de travaux si remarquables, divers physiciens s'occupaient aussi des lampes à arc.

On connaît ces puissants foyers lumineux et on les utilise depuis bien longtemps déjà. Dès 1808, l'illustre chimiste Humphry Davy avait fait l'expérience fondamentale sur laquelle repose le précieux procédé d'éclairage : il avait, on le sait, attaché deux baguettes de charbon taillées en pointe aux pôles d'une pile de 2,000 éléments et observé que si on les écartait doucement, après les avoir mises en contact, il se produisait entre les deux pointes une flamme légèrement arquée.

Cette forme particulière était due au courant d· gaz chauds qui agissait sur la flamme lorsque l charbons étaient placés horizontalement. Dans

position verticale, il n'y a pas d'arc mais une gaine lumineuse; d'autre part, si cette gaine est la région la plus chaude, ce n'est pas la plus éclairante, 85 p. 100 environ de la lumière totale qui est émise proviennent du charbon positif, 5 p. 100 du négatif et 10 p. 100 seulement de l'arc lui-même. L'expression de lampe à arc est donc assez mal choisie, mais elle est restée en usage. La température du charbon positif étant fort élevée et atteignant, d'après M. Violle, 3500°, il n'est pas étonnant que l'on obtienne un rendement excellent, 0,6 à 0,7 watt par bougie; à cette haute température, la radiation de puissance maxima émise par le radiateur intégral se trouverait déjà dans le spectre visible.

La lumière de la lampe à arc est beaucoup plus riche en rayons bleus et violets que les autres lumières artificielles habituellement employées, mais elle l'est proportionnellement beaucoup moins que celle que nous envoie le soleil; une illusion d'optique, due sans doute au contraste, nous la fait souvent trouver d'un bleu violacé; mais en réalité ce sont précisément ces couleurs qui lui manquent encore et elle renferme une proportion plus grande de rayons rouges et jaunes que la lumière blanche.

Si l'on mesure la différence de potentiel qui existe entre les charbons, on trouve qu'elle ne peut jamais, sans que l'arc s'éteigne, devenir inférieure à une trentaine de volts; une lampe à arc se comporte comme un récepteur qui donne naissance à une force contre-électromotrice. Il y a donc de la puissance électrique consommée, en dehors de celle qui se retrouve sous forme de chaleur; on est généra-

lement d'accord aujourd'hui pour penser qu'un phénomène physique bien défini, vaporisation ou mieux ébullition du carbone de l'électrode positive, se produit au dépens de l'énergie électrique disparue. Cependant des expériences de MM. Wilson et Fitzgerald, relatives à l'influence de la pression de l'atmosphère ambiante sur la température des charbons, ne sont pas favorables à cette interprétation, et divers auteurs estiment, avec M. Le Chatelier, que le charbon positif est à sa température de fusion et non pas à une température d'ébullition car, autrement, la force élastique de la vapeur de carbone devrait déjà être considérable à la température à laquelle se trouvent portés d'ordinaire les filaments des lampes à incandescence, ce qui paraît peu vraisemblable. M. Le Roux a émis, il y a longtemps déjà, l'idée que la force électromotrice inverse qui apparait dans l'arc est d'origine thermoélectrique; des recherches récentes de MM. Georges, Aron, Ayrton, semblent confirmer assez bien cette manière de voir; ainsi M. Ayrton a vérifié qu'en chauffant, au moyen d'une source étrangère, le charbon négatif, le voltage nécessaire pour maintenir l'arc s'abaisse.

Les phénomènes qui se produisent dans la lampe sont d'ailleurs très complexes, Mme Ayrton qui a fait, sur ce sujet, une série très remarquable de patientes recherches a, entre autres résultats, mis nettement en évidence le rôle que joue la combustion des charbons dans la stabilité de l'arc; le charbon ne se volatilise pas seulement, mais il brûle à la surface du cratère.

Il est certain d'autre part que les gaz traversés par la décharge électrique sont ionisés; les conditions dans lesquelles fonctionne un arc sont fort complexes, on ne saurait encore appliquer, d'une façon certaine, à l'étude d'une question aussi difficile les résultats obtenus dans ces dernières années par les physiciens ingénieux qui ont débrouillé, dans des cas plus simples, le mécanisme de la conductibilité électrique des gaz; mais on peut prévoir que, dans un avenir prochain, les découvertes récentes permettront de dissiper enfin l'obscurité où restent encore beaucoup de points relatifs à l'expérience, aujourd'hui centenaire, d'Humphry Davy.

Pour être pratiquement utilisable, une lampe à arc doit posséder un appareil régulateur capable de la parer des variations qui se peuvent produire dans la tension d'alimentation, capable aussi de maintenir constante la distance des charbons qui tend à augmenter par suite de la combustion. Les modèles de régulateurs sont extrêmement nombreux; on fait surtout usage aujourd'hui de régulateurs différentiels qui comportent deux bobines: l'une, en dérivation aux bornes de l'arc; l'autre, en série avec lui.

Un système mécanique, commandé par le jeu d'un électro-aimant, agit sur les charbons. L'arc fonctionne aussi bien avec de l'alternatif qu'avec du continu; toutefois, avec de l'alternatif, les deux charbons s'usent également; il ne se forme plus le cratère qui, pour le charbon positif, joue le rôle d'une sorte de réflecteur, et la lampe envoie autant de lumière vers le haut que vers le bas; d'autre part, l'arc s'éteignant et se rallumant chaque fois

que le courant change de sens, produit un éclairage plus fatigant, accompagné d'un ronflement désagréable, dû aux vibrations produites dans l'air.

Si l'on dispose d'une distribution de 110 volts, on pourra mettre deux lampes en série absorbant chacune 35 volts environ et une résistance de réglage absorbant autant de volts qu'une des lampes. C'était le procédé employé jusqu'en ces dernières années ; mais, depuis que les régulateurs se sont perfectionnés et sont devenus plus sensibles, on peut, sans inconvénient, monter trois lampes en série.

Il existe aussi des arcs à haute tension, voisine de 100 volts, que l'on branche directement sur la distribution.

Ces appareils sont les lampes à arc enfermé, qui ont des propriétés intéressantes, mais différentes de celles que possède l'arc ordinaire.

Depuis 1886, où Staite avait, le premier, imaginé une lampe à arc en vase clos, bien des tentatives avaient été faites pour rendre pratique de tels appareils ; ils semblent, à première vue, présenter de grands avantages : propreté, innocuité, diminution de la consommation des charbons et du prix de la main-d'œuvre nécessaire pour les changer.

Mais de graves difficultés s'étaient toujours présentées qu'on n'avait pu écarter ; en particulier, il se produisait sur les globes des dépôts de charbon qui absorbaient, au bout de peu de temps, la lumière émise. M. Marks est arrivé, il y a une dizaine d'années, à combiner un appareil simple et pratique tout le carbone enlevé par le courant au charbon positif se transforme en gaz et il n'y a pas de dépôt ;

un ingénieux régulateur d'admission d'air est disposé pour faire entrer en conflit les courants de gaz sortant de l'appareil ou y pénétrant, de façon à obtenir une parfaite régularité dans l'arc.

D'autres systèmes analogues; celui de M. Jandus, par exemple, fonctionnent très régulièrement; malheureusement, il semble bien, d'après M. Blondel, que le rendement ne soit pas très bon, et la lumière, trop bleue, a souvent d'assez fortes variations d'éclat.

On a été naturellement amené à se demander si l'on ne pourrait, comme pour les lampes à incandescence, substituer au charbon dans la lampe à arc d'autres substances douées de pouvoir sélectif. Jablochkoff, dont le nom se retrouve à l'origine de tous les progrès réalisés dans l'éclairage électrique, avait déjà fait des tentatives intéressantes en ce sens.

M. Bremer, M. Blondel ont proposé récemment des solutions qui ont fourni d'excellents résultats. M. Blondel emploie, comme électrode positive, un crayon formé d'un mélange de charbon et de matières minérales riches en fluorure de calcium; le mélange est protégé par une mince couche de charbon pur; l'électrode négative, qui, ici, doit être placée en haut, est constituée par un charbon ordinaire.

Ce système est souvent désigné sous le nom très exact d'arc-flamme, parce que le fluorure de calcium se volatise et rend l'arc très lumineux; ce n'est plus ici le charbon positif qui émet la plus grande partie de la lumière; il est dépassé, à cet égard, par la

vapeur contenant en suspension les particules des sels de calcium.

On peut, à volonté, allonger l'arc et le faire fonctionner sous des voltages divers, et l'on obtient un rendement tout à fait remarquable : un quart de watt seulement doit être dépensé pour produire une bougie sphérique moyenne. Le seul inconvénient, sérieux d'ailleurs. est que la lumière fortement colorée en rouge ou jaune, suivant la composition du mélange, donne aux objets environnants des teintes auxquelles l'œil est mal habitué et qu'il juge, par suite, désagréables.

§ 4. — L'ARC AU MERCURE ET LA LUMIÈRE FROIDE

Malgré ces résultats vraiment merveilleux, toutes les méthodes qui viennent d'être décrites, fondées sur l'incandescence, restent encore des procédés barbares, puisque, même dans les plus perfectionnées, la proportion des radiations lumineuses aux radiations obscures et chaudes ne dépasse guère, d'après les évaluations les plus récentes, 1 pour 100 ; aucune raison théorique n'interdit l'espoir de produire de la lumière froide, et la nature nous prouve même que le problème n'est pas insoluble.

Le *Pyrophorus noctilocus* ou, pour parler plus simplement, le ver-luisant, d'autres êtres encore émettent un rayonnement contenu tout entier dan~ le spectre visible. Il est même à remarquer que l lumière verdâtre à laquelle, mystérieusement, donn naissance le ver-luisant se trouve précisément cor-

respondre au maximum de sensibilité de notre œil, de sorte que le rendement de cet économique animal se trouve encore être égal à l'unité, alors même qu'on tient compte des coefficients photométriques relatifs aux diverses couleurs.

Dans les phénomènes de phosphorescence, on voit souvent aussi de l'énergie chimique se transformer en énergie rayonnante, correspondant à des ondulations visibles, sans que se produise en même temps une quantité notable de radiations à plus longue période ; il ne paraît nullement impossible, *a priori*, d'arriver à communiquer à l'éther, au moyen de la puissance électrique, des vibrations de fréquences convenables pour l'éclairage et qui ne soient pas accompagnées de l'inutile cortège des radiations infra-rouges.

Le classique tube de Geissler a, depuis longtemps, montré que les gaz raréfiés, traversés par un courant électrique, s'illuminent fortement, et l'analyse spectrale de la lueur qu'ils émettent apprend qu'elle est, cette curieuse lumière, composée de radiations bien déterminées, séparées les unes des autres par de larges intervalles obscurs.

Mais le rendement d'un tel tube serait détestable, les électrodes s'échauffent beaucoup, la résistance du tube est énorme.

Tesla a montré, dans des expériences célèbres, que les courants de haute fréquence peuvent traverser un tube sans électrodes, contenant un gaz très raréfié, en l'illuminant d'une lueur assez semblable à celle du ver-luisant ; mais, ici encore, un abîme sépare la théorie de la pratique et l'on ne voit

pas que le tube de Tesla puisse, directement, rendre des services à l'industrie.

Ce n'est qu'avec l'arc au mercure que les phénomènes de luminescence ont vraiment commencé à être employés pour l'éclairage.

L'idée de produire un arc entre du mercure et une électrode métallique est fort ancienne ; on peut rappeler un appareil déjà assez pratique, breveté en 1879, par Rapieff, et aussi les fort intéressantes expériences où Jamin et M. Manœuvrier démontraient que l'on peut redresser un courant alternatif au moyen d'un arc maintenu entre une électrode de mercure et une électrode de charbon.

Arons, en 1892, construisit une lampe au mercure dans le vide qui a rendu de très grands services aux physiciens. MM. Perot et Fabry, particulièrement dans leurs belles recherches sur les phénomènes d'interférence, ont utilisé un modèle de leur invention pour obtenir une lumière très fixe, formée par quatre raies brillantes très intenses, deux dans le jaune, une dans le bleu, une dans le violet.

Mais ce sont les études remarquables de M. Peter Cooper Hewitt qui ont permis d'obtenir des résultats réellement pratiques.

L'ingénieux savant a imaginé des dispositifs assez divers. Le plus répandu est constitué par un tube assez large (20 millimètres environ de diamètre) et de 1 mètre 50 de long ; le courant est amené par une anode de fer et recueilli par une cathode de mercure. On fait d'abord un vide très poussé dans cett enceinte de verre, et, une fois l'appareil amorcé, dan. la vapeur de mercure va se produire un arc régulie:

qui, sur un réseau à 120 volts, correspondra à un courant de 3 ampères environ.

Mais la grande difficulté réside dans l'amorçage : la résistance au passage du courant est tout d'abord énorme ; pour la vaincre, il faut une tension considérable que l'on peut produire, momentanément et au début, à l'aide d'une bobine d'induction ; ou bien encore, et plus simplement, on établira un court-circuit en inclinant le tube de telle façon que le mercure coule jusqu'à l'anode.

Une fois le gaz ionisé, sa cohésion ne s'oppose plus au passage du courant et il se comporte comme un conducteur, ainsi que l'a établi M. Bouty dans ses belles expériences sur la cohésion diélectrique.

La résistance de la colonne gazeuse n'est pas la seule qu'il faille surmonter. M. Cooper Hewitt a démontré, par de belles expériences, entièrement conformes d'ailleurs à des résultats généraux obtenus par J.-J. Thomson, qu'il existe une grande opposition au passage du courant entre la cathode et la vapeur de mercure ; du côté de l'anode, on ne rencontre rien de semblable.

Cette résistance s'affaiblit beaucoup dès que la surface de la cathode se trouve désagrégée, et la supériorité de l'électrode en mercure sur les autres conducteurs métalliques provient de ce que ce liquide, qui constamment se volatilise et va se condenser sur les parois du tube, joue toujours le rôle d'une surface cathodique en état de désagrégation.

C'est sur cette résistance cathodique spéciale qu'est fondée l'intéressante application, dont nous

avons déjà parlé, de l'arc comme soupape pour les courants alternatifs.

La vapeur de mercure luminescente a, dans le tube de M. Cooper Hewitt, une température voisine de 140° ; elle n'est donc pas portée à l'incandescence, et l'étude du spectre prouve que les radiations émises se composent presque exclusivement d'une radiation jaune orangé, d'une radiation verte et d'une radiation violette, situées, par suite, toutes trois, dans la partie visible.

Ainsi, le mouvement vibratoire communiqué à l'éther ne renferme rien d'inutile ; pour le produire, il a bien fallu encore consommer plus d'énergie électrique qu'il ne serait théoriquement nécessaire, par suite surtout de la résistance cathodique, et le tube finirait par s'échauffer si on n'y prenait garde ; mais le rendement est déjà supérieur à celui des autres sources connues. On ne consomme guère que 0,45 watt environ par bougie.

Le seul inconvénient de ce nouveau mode d'éclairage est de dénaturer complètement les couleurs et de faire apparaître les personnes et les choses sous un jour verdâtre qui est fort peu agréable. Il est vrai que, dans des chantiers, on se préoccupe plutôt de voir bien clair que d'apprécier la teinte des objets ; il est vrai aussi que cette lumière très douce est reposante, qu'elle améliore, paraît-il, le caractère ; mais cet avantage moral n'a pas encore suffi pour assurer le succès des arcs à mercure.

Les inventeurs préfèrent même y renoncer e s'efforcent d'enrichir la lumière de quelques radiations rouges, en entourant, par exemple, le tube

d'une gaze colorée avec des substances telles que la rhodamine. Malheureusement, on perd ainsi une notable partie des radiations émises.

Le système n'est donc pas encore parfaitement au point pour la pratique ; d'ailleurs, la théorie n'est pas non plus tout à fait assise. Nous ne savons pas pourquoi la vapeur de mercure luminescente émet seulement des vibrations de moyenne longueur d'onde ; cette ignorance, d'ailleurs, n'est pas particulière au cas des substances luminescentes, et nous ne sommes guère plus avancés dans la connaissance du mécanisme par lequel un corps échauffé provoque les ondulations de l'éther environnant [1].

Mais alors que nous avons pour nous guider dans l'étude des phénomènes de l'émission la loi fondamentale de Kirchhoff, nous ne possédons rien de précis sur les conditions imposées aux corps luminescents. Il est permis de supposer que, même par leur intermédiaire, toute l'énergie électrique ne pourra pas se transformer intégralement en énergie luminescente ; on doit cependant être assuré d'ores et déjà que, par ce procédé, les résultats relatifs à l'éclairage deviendront singulièrement plus économiques que ceux auxquels conduisent les procédés par incandescence.

1. Ce difficile problème commence cependant à s'éclairer depuis les travaux de Lorentz et ceux d'autres physiciens dont j'ai exposé les recherches dans mon livre : *la Physique moderne*.

CHAPITRE IX

L'Évolution future de l'Électricité

Le riche domaine que nous venons de parcourir a été ouvert aux habiles inventeurs de tant d'importantes applications par les immortels travaux des Faraday et des Ampère; la découverte de l'induction qui a fourni un moyen simple et pratique d'obtenir l'énergie électrique, au dépens de l'énergie mécanique, a été le point de départ de cette rapide évolution qui, comme nous l'avons constaté, a transformé les conditions de toutes les industries, et, par suite, celles de la vie sociale elle-même.

Il semble aujourd'hui que les progrès qui restent possibles dans la voie actuellement suivie ne sauraient plus être que des améliorations de détail. L'un des électriciens français les plus originaux, et les plus ingénieux, M. Leblanc, s'adressant aux membres de la Société internationale des électriciens, disait dans un langage pittoresque: « Notre génération a vécu de l'induction et je crois que ce thème est usé. Nous avons passé notre temps à faire tourner des champs

à gauche ou à droite et à combiner leurs mouvements avec ceux de collecteurs ou de balais. Ces questions ont été tellement travaillées de tout côté qu'on peut les considérer comme épuisées ; si l'on veut trouver quelque nouveauté il faut la chercher dans les tubes à vide ».

Voici, en effet, qu'au moment où il pouvait se croire arrivé au terme du voyage, de nouveaux horizons s'ouvrent devant l'électricien émerveillé, de vastes étendues, encore mal connues, mais dont, déjà, il est permis d'affirmer la fécondité, apparaissent à ses yeux étonnés. Une carrière sans bornes s'étend de nouveau devant nous, que de travaux pour la génération qui arrive, que d'utiles occupations !

Jusqu'à ces dernières années, l'on avait presque exclusivement étudié les phénomènes électriques qui se produisent dans les conducteurs; puis, petit à petit, les idées de Maxwell et de Hertz sur le rôle des diélectriques, pénétrèrent dans la pratique et la découverte de la télégraphie sans fil vint illustrer les nouvelles doctrines.

Plus récemment les recherches effectuées, par une brillante pléiade de savants, sur les phénomènes électriques dans les gaz rarefiés ont fourni des résultats de la plus haute importance pour la philosophie naturelle ; dans les espaces à peu près vides de toute matière, les conditions se simplifient et se rapprochent de celles où de grandioses manifestations électriques se produisent dans l'immensité des espaces interplanétaires. Les hypothèses hardies et récentes relativement à la constitution de la

matière, l'ingénieuse théorie des électrons, paraissent devoir singulièrement modifier nos idées sur la nature de l'électricité et, déjà, quelques applications timides encore, comme cette lampe dont nous parlions dans le chapitre précédent, dérivent directement des découvertes faites au laboratoire par les physiciens de la jeune école.

Et, de même que la télégraphie, la galvanoplastie etc., applications modestes par la petite quantité d'énergie qu'elles mettaient en jeu, ont précédé les grands transports de force et les importants procédés de chimie électrique, de même, le problème résolu par les Marconi et les Branly, les essais de Cooper Hewitt et de tant d'autres, sont là pour nous faire prévoir que la porte est ouverte aux vastes entreprises, et que bientôt peut-être sonnera l'heure des hautes applications industrielles.

Ainsi déjà apparaît la possibilité de transporter, à travers l'espace et sans fil conducteur, l'énergie disponible dans les chutes d'eau et les marées.

Cet éther qui nous amène en quantité énorme, d'une distance considérable, toute l'énergie dont nous pouvons disposer sur la terre et qui nous est envoyée par le soleil, est certainement propre à nous rendre, à notre volonté, de plus modestes services.

Le mécanisme qui, dans les ondulations hertziennes, transmet une puissance très faible, peut aussi bien, en principe, conduire des centaines de kilowatts, et il n'est pas défendu de penser que le jou n'est plus lointain où des moteurs seront actionnés des lampes électriques allumées dans des circuit

sans communication matérielle avec les circuits primaires et placés à des distances assez grandes de ceux-ci. Remarquons bien que l'espace pourrait ainsi être sillonné par des ondulations qui resteraient sans action appréciable sur les circuits autres que les récepteurs, accordés au préalable de façon à former résonnateur.

D'autre part, on commence à apercevoir la possibilité d'obtenir, d'une manière véritablement pratique, l'énergie électrique au moyen de l'énergie calorifique ou de l'énergie chimique; là encore, une grande question économique ne semble pas éloignée de recevoir une solution favorable.

Ainsi les moyens de communication, la télégraphie, la téléphonie, demain peut-être la vision à distance, rapprochent les hommes les uns des autres, contribuent à amener la définitive satisfaction de ce besoin de fraternité et de concorde que ressentent tous les peuples; et, d'autre part, les progrès quotidiennement réalisés dans la façon de produire et de transmettre l'énergie en quantité considérable, accentuent ce mouvement industriel et social dont, par des exemples précis, nous espérons avoir, au cours des pages qui précèdent, fait comprendre le sens et l'importance.

Bientôt, sans doute, après le domaine industriel désormais conquis, l'électricité s'annexera l'agriculture; les irrigations, lès drainages peuvent déjà se faire avantageusement au moyen des moteurs modernes et bien des machines agricoles sont mises en mouvement par le courant.

Et, partout, en même temps que d'énormes béné-

fices économiques, l'évolution qui se poursuit apportera de plus grands bienfaits encore. Qui ne voit, en effet, apparaître avec elle la grande et profonde utilité sociale qui lui est inhérente ?

Avec le progrès actuel du mécanisme, la tâche du travailleur s'ennoblit chaque jour : le laboureur, dans les champs, et l'ouvrier, dans l'usine, prennent conscience du rôle essentiel que partout doit jouer l'intelligence.

Les besognes serviles tendent à disparaître ; trop longtemps, sous une forme atténuée sans doute, mais encore pénible et opprimant, a duré l'asservissement à la nature.

« Quand la navette marchera toute seule, disait Aristote, on pourra peut-être supprimer l'esclave ». Ces temps que le philosophe antique considérait comme ne devant jamais venir, ne paraissent plus éloignés aujourd'hui : bientôt, mue par l'énergie que la science a su conquérir, la navette travaillera sous la direction active et intelligente d'un homme sur qui ne pèseront plus les servitudes de la matière et, dans le domaine moral comme dans le domaine économique, l'Électricité aura été la grande libératrice.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE IV

Les machines génératrices.

CHAPITRE V

Les moteurs.

CHAPITRE VI

Le transport de l'énergie électrique.

CHAPITRE VII

Énergie chimique et énergie électrique.

CHAPITRE VIII

L'Éclairage électrique.

CHAPITRE IX

7921. — Paris. — Imp. Hemmerlé et Cie.